INVESTIGACION y CIENCIA

FISICA CUANTICA DE LOS VIAJES A TRAVES DEL TIEMPO

ELECTRONICA DE SILICIO-GERMANIO ULTRARRAPIDA

RANAS Y SAPOS DESERTICOLAS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



NAUTILE

MAYO 1994
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa




Mayo de 1994 Número 212

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ana María Rubio: *¿Habrá alimentos para una población humana creciente?*; Santiago Torres: *Sustitución dirigida de genes*; Montserrat Domingo Morató: *El manto terrestre suboceánico*; J. P. Campos: *Física cuántica de los viajes por el tiempo*; Joandomènec Ros: *Ranas y sapos deserticolas*; J. Vilardell: *Hace...*; Diego Pavón: *Perfiles*; : *De cerca*; Luis Bou: *Juegos Matemáticos*.

Ciencia y sociedad:

Mónica Murphy, Ramón Pascual, J. M.ª V. Martínez

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: George Retseck

Página	Fuente
9	Cortesía de International Business Machines Corporation
10-11	Ian Worpole
12	IBM (*izquierda*), Johnny Johnson (*derecha*)
13	Ian Worpole
15	Steve Vidler/Leo de Wys, Inc.
16	Johnny Johnson
17	Patricia J. Wynne
18	Johnny Johnson
19	Ed Kashi/J. B. Pictures
20	Cortesía de Ag-Chem Equipment Co., Inc.
22	Mario R. Capecchi
23	Tomo Narashima
24-27	Jared Schneidman Design
28	Mario R. Capecchi (*arriba*), Tomo Narashima (*abajo*)
40-41	Jack Harris/Visual Logic
42	Gabor Kiss (*arriba*), Dimitry Schidlovsky (*abajo*)
43	William F. Haxby, Lamont-Doherty Earth Observatory
44-45	Dimitry Schidlovsky (*arriba*), Jack Harris/Visual Logic (*abajo*)
46-47	Dimitry Schidlovsky
48-49	Patricia J. Wynne
50-53	Dimitry Schidlovsky
57	Técia Ulisses de Carvalho, Marcos André Vannier Santos, Andréa Martini y Edéseio de Melo
58	Técia Ulisses de Carvalho y Wanderley de Souza
59-60	Arturo Gonzales-Robles, Adolfo Martinez-Palomo y Wanderley de Souza
61	Thais Souto-Patrón y Wanderley de Souza
63	Laís de Carvalho y Wanderley de Souza (*arriba*), Técia Ulisses de Carvalho y Wanderley de Souza (*abajo*)
64-65	Vaughan H. Shoemaker
66-67	Roberto Osti; Jason Küffer (*mapas*)
68	Roberto Osti
69	Arthur Gloor/Animals Animals (*arriba a la izquierda*), Paul Freed/Animals Animals (*arriba a la derecha*), Rodolfo Ruibal (*abajo*)
70	Johnny Johnson
72-73	Patricia J. Wynne
74	Jason Goltz
75	Jared Schneidman Design
76	Stephanie Rausser
77	Jared Schneidman Design
78	Chirs Usher/Black Star
79	Jared Schneidman Design
80	Stephanie Rausser
87	Patricia J. Wynne



La figura de la portada muestra el *Nautile* deslizándose a ras de la dorsal mesooceánica, cadena rocosa que divide el Atlántico de norte a sur. El sumergible puede llegar hasta seis kilómetros de profundidad. Aloja tres tripulantes en una esfera de titanio de 1,8 m de diámetro, cuyas portillas dejan ver el exterior. El *Nautile* recoge muestras de roca que permite determinar el papel de la convección del manto en los accidentes de la superficie terrestre (*véase* "El manto terrestre suboceánico", de Enrico Bonatti, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

....cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un sistema telefónico bidireccional, que permite mantener comunicación con trenes en movimiento, entre trenes y entre la cabeza y la cola de un mismo tren acaba de entrar en servicio en los Ferrocarriles de Pennsylvania. Este sistema, el único de su naturaleza instalado hasta la fecha, se ha montado en el servicio de mercancías del ramal de Belvedere a Delaware (algo más de 100 km), que sale de Trenton (New Jersey) y se encamina hacia el norte.»

«Los pilotos pueden entrenarse en vuelos nocturnos de día. Lo permite una nueva técnica, que consiste en cubrir el parabrisas y las ventanillas del avión con acetato verde y hacer que el piloto use unas gafas rojas. La combinación de filtros suprime la visión del piloto sobre lo que hay fuera de la carlinga y le acerca así a la visión nocturna. Pero el instructor no lleva gafas rojas y puede ver más allá de la carlinga y apreciar la luz del Sol.»

«Según la firma Hercules Powder Company, un cubrimiento de plástico que elimina todas las cerdas cuando se despelleja el animal permite que las amas de casa dispongan de jamón, bacon, manteca y cortes de porcino de mayor calidad. Este método de rasurado químico, que ya han adoptado los conserveros de carne de bovinos, ahorra tiempo de manipulación y reduce los costes de pelado.»

...cien años

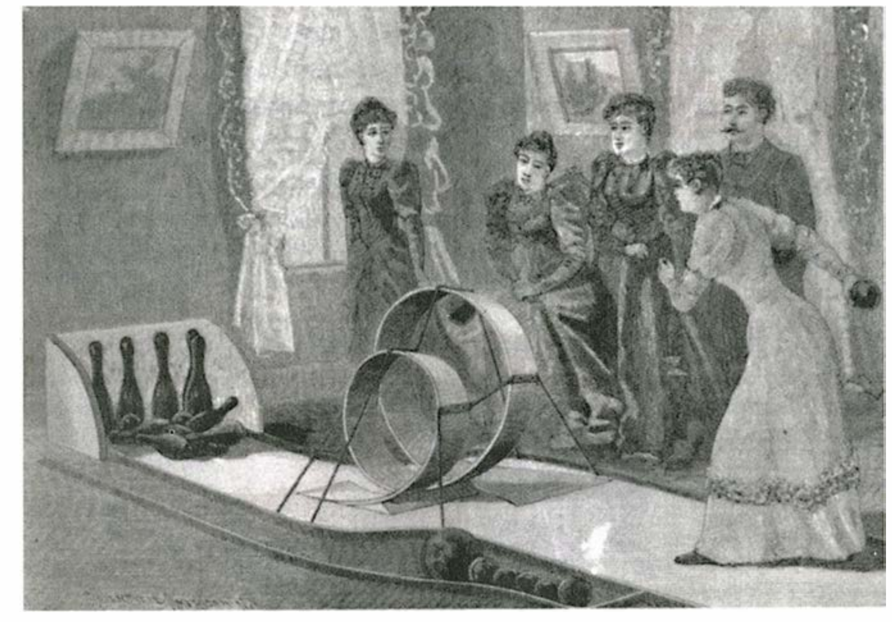
SCIENTIFIC AMERICAN: «El acalorado debate acerca del sufragio de la mujer pone de nuevo sobre el tapete numerosos hechos ya establecidos relativos a las diferencias entre los sistemas nerviosos de ambos sexos. Los psicólogos no albergan dudas de que las características mentales de las mujeres tienen su base estructural en la cantidad y calidad de sus tejidos nerviosos. En última instancia, ello no prueba que la mente femenina no se adapte a los requerimientos del sufragio, o a la actividad política, o no puedan participar en un jurado o servir en los ejércitos. Lo único que muestra es que las consecuencias de concederles el sufragio no puede predecirse con seguridad ni de uno ni de otro modo. Se trata de una experiencia que podría o no resultar atinada.— *Med. Record*».

«La fecundación del jazmín trompeta no fue nunca explicada satisfactoriamente hasta que Mr. Hamilton Gibson descubrió que es obra de los pájaros mosca. Estos hunden sus largos picos en el nectario que encuentran en la base de cada flor y se van con los lomos cubiertos de polen, que traspasan a otras flores cuando en ellas buscan el mismo alimento.»

«Mr. Henry Wilde, F. R. S., de la ciudad inglesa de Manchester, mantiene la teoría de que el exterior de la Tierra es siempre magnético; hay además una suerte de globo interno, móvil y magnético, que rota en el plano de la eclíptica, 23,5 grados, y pierde una revolución cada 960 años; plantea, asimismo, la hipótesis de que esa esfera interna es electrodinámica. Durante una reciente charla en la Regia Sociedad mostró dos globos terrestres, uno dentro de otro y con sendos arrollamientos de hilo conductor aislado, por los que podía enviar corrientes eléctricas, montados de manera que sus movimientos concordaran con sus hipótesis. Colocando una brújula sobre distintas zonas del globo exterior, consigue las mismas declinación e inclinación magnéticas que en la naturaleza.»

«La conservación de ciertas especies animales americanas, al borde de la extinción, fue la causa fundamental de la solicitud al Congreso de que se establezca un parque zoológico nacional en Washington. Las asignaciones reclamadas, aunque muy moderadas, se rebajaron en todos los casos. Por ejemplo: para construir los edificios necesarios se pidieron 36.850 dólares y el Congreso redujo ese presupuesto a 18.000. Pese a todo, se consiguieron unos resultados sumamente satisfactorios.»

«Una pista de bolos de primera calidad cuesta 250 dólares y requiere un revestimiento del suelo de 25 metros de largo por uno ochenta de ancho. A nadie se le ocurriría, pues, practicar ese juego en una casa o vivienda de dimensiones normales. Ofrecemos en nuestro grabado un sistema ideado para adaptarse a las condiciones de la vida doméstica. En lugar de la pista larga y recta, la bola recorre un trayecto circular cicloideo. El lanzamiento se efectúa del modo habitual, la bola rueda arriba y abajo de la pista espiral y avanza hacia los bolos que se encuentran en el otro extremo de la habitación.»



Pista de bolos centrífuga

Electrónica de silicio-germanio ultrarrápida

Estos nuevos dispositivos electrónicos aventajan a los tradicionales de silicio sin requerir métodos de fabricación distintos de los ya normalizados

Bernard S. Meyerson

Los microprocesadores realizados en pastillas (chips) de silicio hasta tal punto se han asentado en la vida moderna, que ya nadie se asombra de que las muñecas hablen, las tarjetas de felicitación canten y otras mil lindezas por el estilo. Pese a la inmensa difusión lograda, algunos llevan años afirmando que la técnica del silicio se acerca a sus límites físicos; no es posible, afirman, alcanzar mayores velocidades sino a costa de achicar las dimensiones hasta extremos en que ya no pueden funcionar los dispositivos. Si esto es así, para que el progreso continúe habrá que encontrar una alternativa al silicio, y la industria electrónica se enfrentará entonces a un período de transición durísimo. Pero, ¿será verdad que la era del silicio está llegando a su ocaso?

En colaboración con un equipo de investigación y fabricación de IBM, el autor ha explorado modos de conseguir prestaciones superiores a las que ofrece la técnica del silicio, modificando la composición de las pastillas. En el pasado, las mejoras de velocidad y versatilidad se debieron a la miniaturización de los circuitos. En vez de seguir ese camino, nuestro grupo se concentró en el uso de materiales en los que los electrones se desplazan a velocidades mucho mayores, logrando así un funcionamiento más rápido. Hemos demostrado que, partiendo de una aleación de silicio y germanio, dos elementos semiconductores harto conocidos, pueden obtenerse transistores de altísima velocidad. Como es bien sabido, el transistor es un sencillo conmutador sobre el que se construye la electrónica moderna.

BERNARD S. MEYERSON ha ideado la técnica de deposición química de vapor en vacío ultra-alto, que permitió fabricar los transistores ultrarrápidos de silicio-germanio. Tras doctorarse por la Universidad Metropolitana de Nueva York en 1981, ingresó en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, donde dirige el grupo de materiales electrónicos.

Además, los dispositivos que acabamos de desarrollar pueden fabricarse en las actuales líneas de producción de micropastillas, rentabilizando así las enormes inversiones que tales medios fabriles representan. Esperamos, pues, que la técnica del silicio continúe dominando el diseño en electrónica, y nos atrevemos a predecir que volverá a reclamar para sí funciones que habían sido cedidas a otros materiales más exóticos.

En colaboración con un grupo de diseñadores de Analog Devices, IBM ha sacado los primeros productos comerciales que incorporan transistores de silicio-germanio de alta prestación. En unos pocos años, estos transistores y otros dispositivos de silicio-germanio hallarán probable aplicación en una amplia gama de productos, entre ellos los aparatos de comunicaciones personales y los conversores electrónicos de señales, los cuales extraen datos digitales de la red de cables de fibra óptica.

Factor esencial para controlar la capacidad de los ordenadores y de otros equipos electrónicos es la velocidad de operación de los componentes; su espectacular aumento en las últimas décadas se ha logrado merced a la miniaturización. El elemento básico de los circuitos electrónicos modernos es el transistor, cuya actuación se reduce a una sencilla conmutación todo-nada en la que reside el fundamento de los ordenadores digitales. Mirándolo más de cerca se puede entender cómo funciona y por qué al achicar su tamaño se consigue mejorar sus prestaciones. Además se descubre la razón de que ese proceso de reducción no pueda prolongarse indefinidamente.

En la electrónica del silicio intervienen dos tipos principales de transistores: bipolar y de efecto de campo. En los transistores de efecto de campo, la corriente eléctrica entra por un electrodo (fuente) y sale por otro (drenador). La región del dispositivo atravesada por la corriente recibe el nombre de canal. Otro electrodo del transistor, la puerta, controla el flujo de corriente a través de dicho canal. Compete a la puerta crear un campo eléctrico capaz de llenar o de vaciar de cargas eléctricas el canal, con lo cual respectivamente inicia o detiene la circulación de corriente. Cuando pasa corriente por el canal, el transistor está activado (*on*), y desactivado (*off*), cuando no pasa corriente.

El transistor de efecto de campo presenta una ventaja significativa: su moderado consumo de energía. Para hacerlo funcionar basta con cargar el electrodo de puerta a cierta tensión crítica. Una vez que la puerta adquiere la carga adecuada, no se necesita corriente adicional para mantener el transistor activado o desactivado. Así, a no ser durante la misma conmutación, el transistor de efecto de campo no consume potencia. Son, por tanto, ideales para aplicaciones en las que el consumo de potencia es bajo, como los ordenadores portátiles, por ejemplo.

Los ordenadores de altas prestaciones prefieren los transistores bipolares, que pueden trabajar a mayores velocidades pero consumen bastante más energía. En la clase común de

1. TRANSISTOR constituido por una mezcla de silicio y aleación de silicio-germanio. Hace cuatro años, este ingenio demostró que la nueva tecnología superaba, de lejos, la velocidad de la electrónica del silicio.

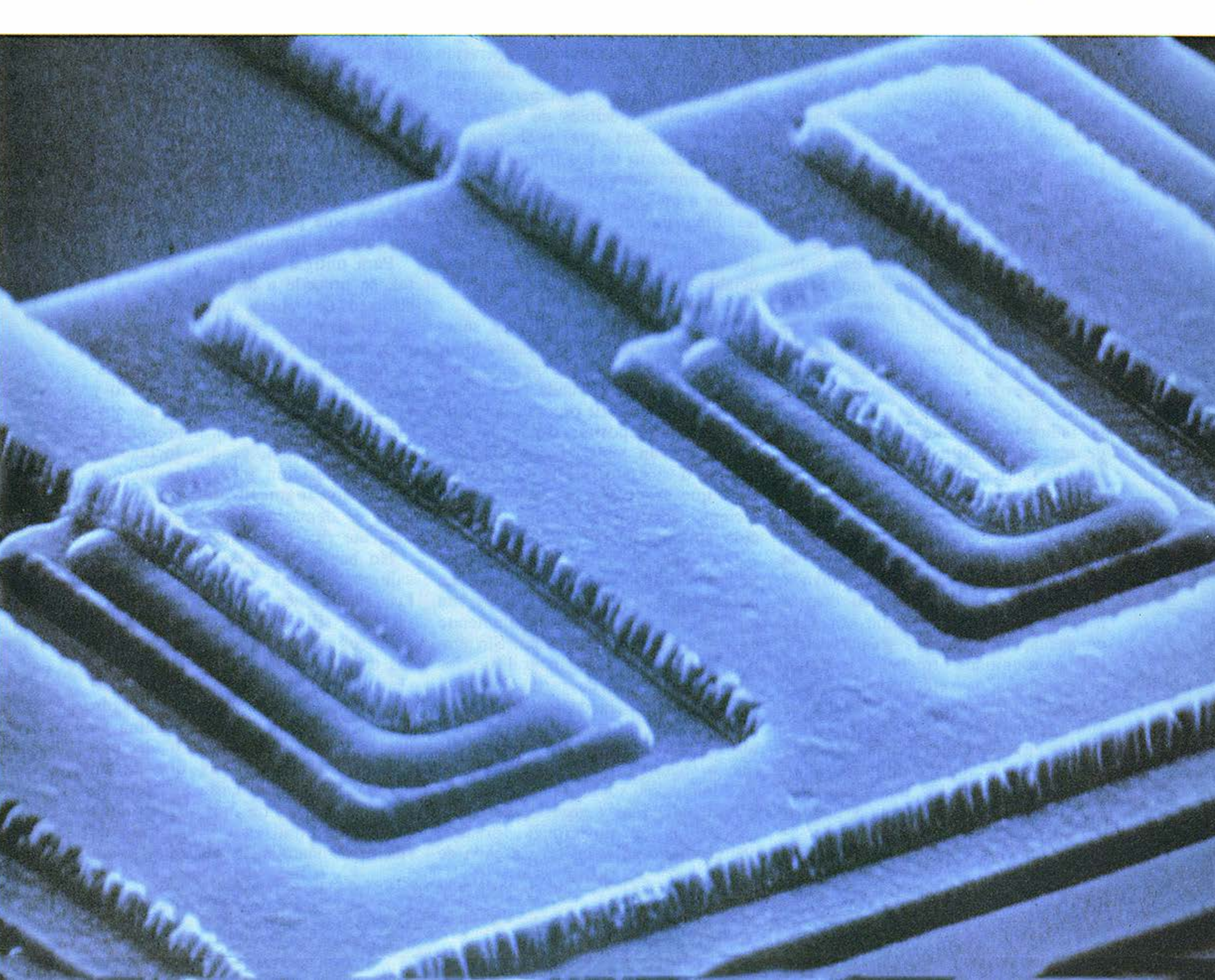
transistor bipolar, el NPN (negativo-positivo-negativo), los electrones van desde la zona del emisor hacia la zona del colector. El transistor se activa inyectando una pequeña corriente en la zona llamada base, y esa corriente hace rebajar una barrera energética constante e inherente al material que bloquea el paso de electrones. Cuando esta barrera cae, empieza a circular corriente por el transistor, que se conmuta entonces al estado activo. La intensidad de la corriente es proporcional, aunque de valor muy superior, a la de la corriente inyectada en la base.

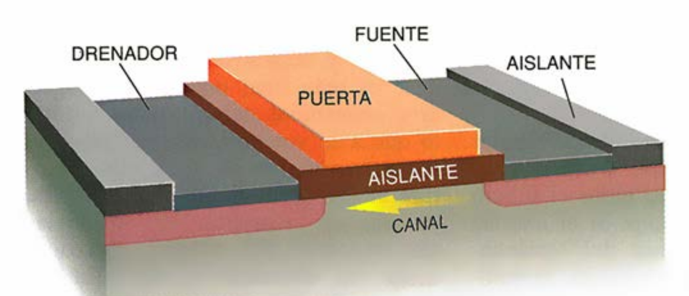
La base de un transistor bipolar debe contener una carga eléctrica constante de valor suficiente para mantener elevada la barrera energética, de forma que el transistor permanezca desactivado cuando no se aplica corriente a la base. Se crean estas cargas introduciendo en el silicio átomos de impurezas específicas (dopantes), durante el proceso de fabricación. Dependiendo de la naturaleza de los átomos dopantes, la carga será positiva o negativa. Así, el silicio dopado será de tipo-*n* cuando estén en exceso las cargas negativas, y de tipo-*p* cuando predominen las positivas.

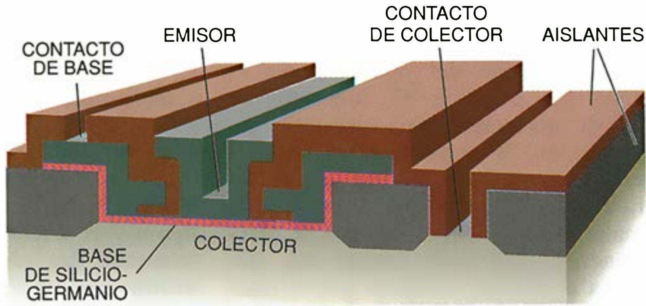
La función de un transistor bipolar depende de las propiedades eléctricas del interfaz entre el silicio tipo-*n* y el silicio tipo-*p*. Si el interfaz relaciona dos regiones del semiconductor que tienen la misma composición básica —silicio, en la mayoría de los casos— pero tipos opuestos de dopado, se le denomina homounión. En cambio, se llamará heterounión cuando los materiales sean de diferente naturaleza. Las homouniones, mucho más fáciles de fabricar, predominan en los diseños de circuito actuales.

El tamaño de un transistor, ya sea de efecto de campo o bipolar, determina su velocidad de operación. En un transistor bipolar, el tiempo que tardan los electrones en atravesar la base constituye un importante factor limitante de la velocidad. Toda reducción en el espesor de la base hará disminuir el trayecto que han de recorrer los electrones, aumentando así la velocidad a la que el transistor puede activarse y desactivarse. Además, si la base es más fina, podrá achicarse el área superficial del transistor entero, lo que a su vez permitirá un empaquetamiento más denso. Con ello mejorará el comportamiento de la pastilla, ya que se acortarán las distancias que recorren las señales eléctricas desde un transistor a otro. En los transistores de efecto de campo, la reducción de tamaño conduce a similares mejoras de las prestaciones.

Estas razones han alentado el desarrollo de transistores cada vez más diminutos, siguiendo la estrategia de reducción de escala: potenciar la función del dispositivo mediante la disminución de sus dimensiones críticas. Aunque la reducción de escala ha traído muchos años de progresos en la velocidad y la flexibilidad de la electrónica del silicio, la tendencia no puede proseguir indefinidamente. Y el motivo de tal limitación se desprende de la propia naturaleza del transistor bipolar.







2. TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO (*izquierda*); trabaja por modulación de la intensidad de campo eléctrico en la puerta. Dependiendo del diseño del transistor, ese campo puede permitir, o detener, el paso de corriente a través del canal, de la fuente al drenador. Cuando pasa corriente, el transistor está activado ("on"). El transistor bipolar (*derecha*) se activa cuando los electrones se desplazan de emisor a colector. Una barrera de energía intrínseca impide tal movimiento, pero cuando se inyecta corriente a la base la barrera cae y los electrones circulan por el transistor. El aquí ilustrado incorpora una capa de silicio-germanio que acelera los electrones y así aumenta la velocidad del dispositivo.

La reducción de escala conlleva la disminución del grosor y el volumen de la base del transistor; por tanto, la densidad de dopante habrá de crecer para mantener constante la carga total de la base. En términos sencillos, habrá que apiñar el mismo número total de átomos dopantes en volúmenes cada vez menores de la base. Por desgracia, una homounión de silicio con niveles muy elevados de dopante a uno y otro lado pierde corriente. Si se continúa achicando de escala el transistor bipolar NPN, la densidad de dopante en la base terminará por alcanzar un grado tal que seguirá pasando corriente por el transistor aunque se encuentre desactivado, con lo que el transistor habría dejado de servir.

Los diseños de pastillas empiezan a rozar los límites naturales de la reducción de escala. Se buscan soluciones alternativas para aumentar la velocidad de los dispositivos. De hecho, la limitación física que impone la escala es un argumento fundamental a favor de otros materiales semiconductores más raros, como el arseniuro de galio. Pero es el caso que la industria ha invertido sumas ingentes en utensilios e instalaciones para la fabricación de dispositivos de silicio; convendría mucho hallar un medio para funcionar más aprisa sin tener que abandonar el silicio.

Gran parte de nuestro esfuerzo se ha centrado en desarrollar esta renovada tecnología del silicio, dando cuerpo a una antigua idea. Mediados los años cincuenta, hubo quienes señalaron que las heterouniones ofrecían un camino para aumentar la velocidad de conmutación de un transistor, no por reducción de su tamaño sino por alteración de sus propiedades electrónicas. Los campos eléctricos generados de un modo natural en los dos materiales que forman una heterounión pueden confinar las cargas negativas o positivas en lados opuestos del interfaz. Si el material de la unión varía gradualmente de una composición a otra, en esa región de transición progresiva podrá establecerse un campo eléctrico intensificado.

Al final de los cincuenta, Herbert Kroemer propuso utilizar el campo generado en una heterounión progresiva para hacer que los electrones atravesaran rápidamente la base de un dispositivo bipolar. Al obligar a los electrones a moverse con mayor presteza, las heterouniones operarían mucho más aprisa que las homouniones de similar tamaño. Kroemer imaginó varias parejas posibles de materiales semiconductores que acelerasen el funcionamiento de los transistores; la más prometedora era la formada por silicio a un lado y germanio al otro. La idea parecía acertada, pero el problema práctico de construir una heterounión de silicio-germanio manejable resultó ser inabordable.

En los años sesenta hubo un suceso esperanzador: el desarrollo de la técnica epitaxial, que parecía muy adecuada para la delicada fabricación microelectrónica. El proceso epitaxial consiste en depositar capas de átomos sobre un material cristalino. El cristal, o sustrato, sirve de plantilla para que las capas de acumulación reciente adopten la misma disposición atómica que el propio cristal.

Dado que el silicio y el germanio tienen la misma estructura cristalina, puede depositarse una capa de un material sobre el otro, manteniendo un orden atómico coherente. Sin embargo, la separación natural de los átomos del cristal de germanio es un 4 % mayor que la de los átomos de un cristal de silicio. Por sí mismos, los átomos de germanio se extenderían a su separación normal, pero al ser colocados sobre un sustrato de silicio mucho más grueso se quedan enclavados en posiciones forzadas por el silicio subyacente. La capa de átomos de germanio depositada sobre un sustrato grueso de silicio experimenta, pues, una tensión enorme, que va en aumento al acumularse capas suplementarias.

Finalmente se forman defectos en el germanio que alivian la tensión. Cuando se produce un defecto, hay hileras completas de átomos de germanio forzadas a escapar de la retícula, dejando así separarse más a los restantes átomos de la capa. Para que la estructura alcance un estado de relajación total, deben salir de la retícula cuatro de cada 100 átomos de germanio que hayan crecido a lo largo de la juntura germanio-silicio. Sin embargo, esta exclusión de átomos de germanio originaría billones de defectos en superficies como la de una sola pastilla, demasiados para su correcto funcionamiento.

Para mitigar la tensión en el cristal, se procede a desarrollar sobre el sustrato de silicio una aleación de silicio-germanio, en vez de capas de germanio puro. Esta aleación presenta una separación atómica característica, intermedia entre la del silicio y la del germanio. Se requiere, no obstante, un gran cuidado al preparar la capa de aleación, ya que incluso en una composición mixta de silicio y germanio aparecen defectos si la capa es demasiado gruesa o excesivamente rica en germanio.

No había forma de superar el desajuste reticular, o disparidad entre las separaciones atómicas de los cristales de silicio y germanio. En los primeros años ochenta, la mayoría de los trabajos dedicados a ese objetivo se apoyaron en la técnica denominada epitaxia de haz molecular. Según ese método, la película cristalina se desarrolla ("crece") dentro de una cámara de acero en la que se ha practicado el vacío hasta una presión interior menor de una billonésima (10^{-12}) de atmósfera. El sustrato de silicio se monta en la cámara y se ca-

lienta a 1100 ºC por lo menos. Esta achicharrante temperatura evapora los contaminantes del silicio y deja una superficie limpia sobre la cual puede formarse ("crecer") la película.

Tras la limpieza a alta temperatura, se deja enfriar un tanto la superficie, y luego se deposita una capa tampón de silicio puro sobre el sustrato con el fin de enterrar cualquier contaminación residual. Unas cubetas de silicio y germanio fundidos en la base del aparato proporcionan la fuente de átomos; para formar la película deseada se dirigen haces de tales átomos hacia el sustrato de silicio, sobre el cual inciden y se acumulan en capas cristalinas.

Para reducir al mínimo la tensión debida al desajuste reticular, el trabajo se centró en construir capas de aleación silicio-germanio con un contenido de germanio menor del 30 %. Finalmente, la epitaxia de haz molecular permitió fabricar estas heterouniones, sin apenas defectos, aunque sólo valieron como modelos de laboratorio.

En vista de ello algunos abandonaron la epitaxia de haz molecular por una técnica alternativa: la deposición química en fase vapor. En ella se utilizan moléculas de gas que incorporan los átomos deseados —silicio y germanio, en este caso. El flujo de gas transporta estos átomos a la superficie del sustrato, donde se agrupan y forman las nuevas capas cristalinas. Esta vieja técnica es, en muchos aspectos, más sencilla que la epitaxia de haz molecular.

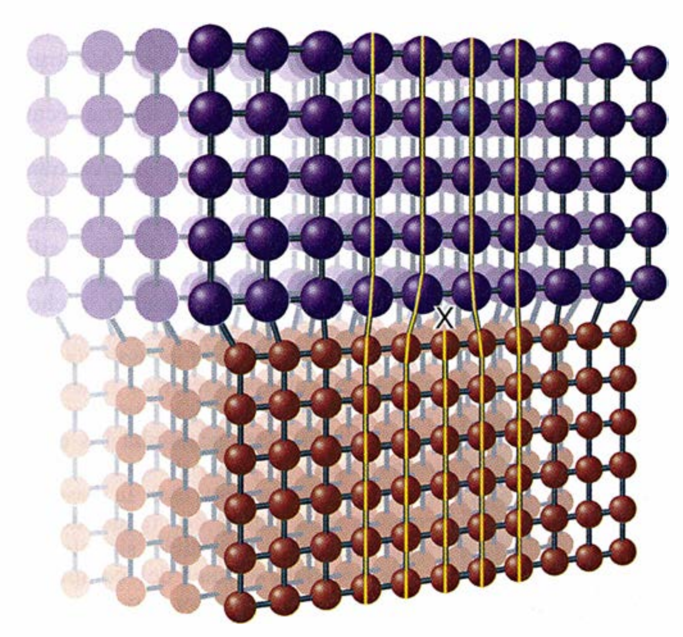
El inconveniente mayor de la deposición en fase vapor eran las elevadas temperaturas requeridas: 1100 ºC para la limpieza inicial y 1000 ºC para el crecimiento de las películas. Sometidos a un calor tan intenso, unos materiales ya fatigados, como los de la aleación silicio-germanio, acusan muy pronto defectos. Por otra parte, la adición de material dopante no puede hacerse con precisión a temperaturas muy elevadas. Por encima de los 800 ºC los átomos dopantes se difunden en el silicio o el germanio, apartándose de su posición inicial. La deposición química en fase vapor no permitía obtener heterouniones utilizables entre silicio y germanio mientras que el proceso exigiera temperaturas tan altas.

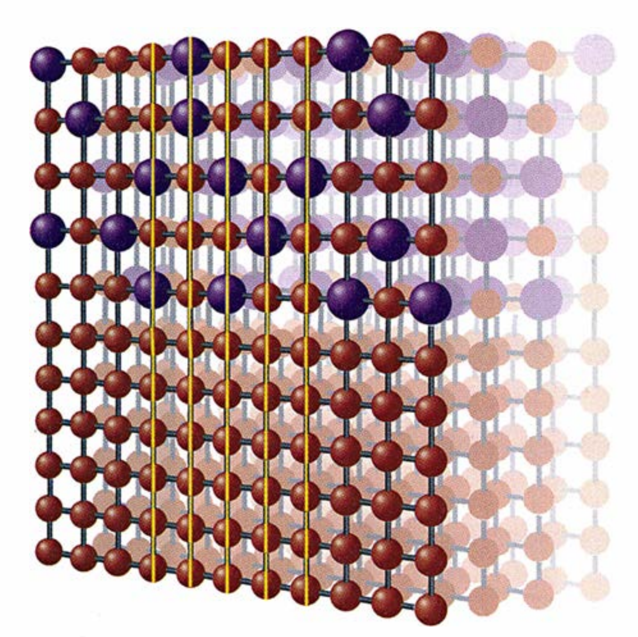
Había que encontrar un medio para realizar la deposición química en vapor a temperaturas más bajas. Nosotros nos centramos en dos etapas esenciales del proceso que aparentemente exigían temperaturas altas: la limpieza de la superficie de silicio antes de crecer la película, y el propio desarrollo de una película exenta de defectos.

La finalidad primaria de la limpieza es desalojar los óxidos de silicio que se forman cuando el silicio puro entra en contacto con el aire o la humedad. Los óxidos de silicio no tienen estructura cristalina, por lo que interferirían con la epitaxia de no ser eliminados. Además, absorben del aire un dopante del silicio, el boro, y lo atrapan en la superficie del silicio a concentraciones peligrosamente altas. A temperatura ambiente el óxido de silicio crece sobre la superficie hasta un espesor de unas 10 capas atómicas, y a partir de ahí actúa como una barrera que protege el silicio recubierto de nuevas reacciones con el aire.

Es harto conocido que la inmersión de una oblea de silicio en ácido fluorhídrico elimina el revestimiento de óxido, pero el saber tradicional sostenía que los óxidos volvían instantáneamente a formarse cuando se exponía nuevamente al aire la oblea. En consecuencia, todos los métodos de epitaxia incluían la exposición del silicio a altas temperaturas dentro del horno, aun cuando ya se hubiera eliminado el óxido por medios químicos (ácido fluorhídrico). Algo me hizo sospechar que el saber tradicional se equivocaba.

Cuando era alumno de doctorado y practicaba con obleas de silicio, no pude evitar que alguna se me cayera. Observé que, al enjuagarlas en agua, las obleas no se quedaban mojadas, sino que toda el agua se escurría de su superficie. Ahora bien, el óxido de silicio atrae el agua; por tanto, si la oblea no podía mojarse tal vez ello indicara la ausencia de óxido; en muchos casos esto sucedía al cabo de varias horas de haber limpiado las obleas en un baño de fluorhídrico.





3. SEPARACION INTERATOMICA en un cristal de germanio (*morado*) y en el silicio (*rojo*); ligeramente mayor en aquél. Este desajuste reticular (*izquierda*) ha hecho fracasar las tan buscadas uniones entre silicio y germanio, muy deseadas por sus propiedades electrónicas. Los átomos de germanio depositados sobre el silicio siguen inicialmente la disposición atómica de éste, pero en cuanto vuelven a su separación natural dan origen a defectos (*marcados con X*) que crean cortocircuitos y desbaratan la unión. El crecimiento de capas de aleación silicio-germanio libres de defectos sobre sustratos de silicio (*derecha*) ha permitido obtener cristales híbridos, base de un nuevo tipo de dispositivos electrónicos ultrarrápidos.

Parecía, pues, que el óxido de silicio tardaba bastante en volver a formarse.

Dentro ya de IBM, me enfrasqué en la bibliografía de primera hora y descubrí el origen de la idea falsa de la formación instantánea del óxido de silicio. Años atrás, los investigadores empleaban toscas sondas ópticas y creyeron haber detectado óxido de silicio cuando en realidad habían observado la delgada capa de hidrógeno que se forma después de haber limpiado el silicio en ácido fluorhídrico. El uso de sondas modernas, químicamente selectivas, ha confirmado que el silicio puede mantenerse libre de óxido muchas horas después del baño en fluorhídrico. La capa de hidrógeno adherida al silicio protege del aire la superficie y retrasa la formación de óxido.

Esa capa protectora permite suprimir una etapa preparatoria de la epitaxia a temperaturas altas. La limpieza con ácido fluorhídrico no sólo admite las temperaturas bajas sino que las exige, puesto que un calor demasiado intenso eliminaría la capa de hidrógeno.

El siguiente desafío fue encontrar el medio de desarrollar una película de alta calidad a baja temperatura. Los primeros trabajos en epitaxia del silicio indicaban que el número de defectos en la película depositada aumentaba espectacularmente al descender la temperatura. Las impurezas presentes durante la deposición química en fase vapor —oxígeno y agua— se incorporan por sí mismas a las películas con facilidad mucho mayor a temperaturas bajas que a temperaturas altas. Dichas impurezas pueden agruparse en el seno de una capa en crecimiento, produciendo defectos en el material.

Para remediar el problema hay que reducir al mínimo la concentración de átomos extraños en la cámara donde se verifica la deposición en vapor. Los experimentos de laboratorio han indicado que el crecimiento de películas sin contaminar a temperaturas inferiores a 700 ºC exigiría un vacío rigurosísimo, aunque todavía menos perfecto que el requerido para la epitaxia de haz molecular.

¿Cómo podrían eliminarse los posibles focos de contaminación del interior de un aparato de crecimiento cristalino? En IBM, logramos suprimirlos con bombas de vacío especiales y cierres de sellado hermético. Conseguimos un vacío ultra-alto dentro de un tubo de vidrio, rodeado por un horno que suministra el calor requerido por la epitaxia. Este montaje garantiza que el aparato no aporte impurezas que obstruyan el crecimiento de la película. Una esclusa neumática especial permite cargar la cámara de crecimiento principal sin tener que exponerla a la atmósfera circundante. Esto es importante porque los contaminantes del aire se agarran tenazmente al interior de la cámara y se tarda mucho tiempo en desecarlos y bombearlos al exterior.

Los gases que portan silicio y germanio y circulan por el aparato durante la deposición química pueden también ser fuente de contaminación. Por ello mantenemos muy baja la presión en el reactor, del orden de una millonésima de atmósfera, para que la cantidad de material extraño introducido por ese conducto sea mínima. Con razón llamamos a nuestro método técnica de deposición química en vapor al vacío ultra-alto.

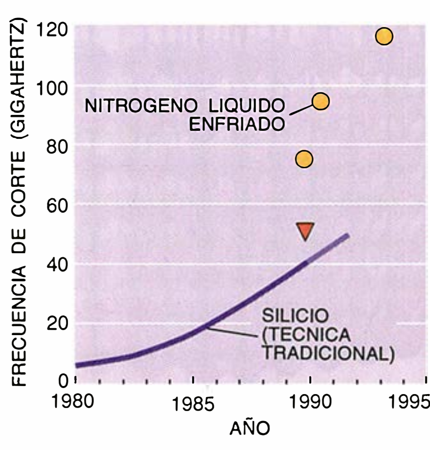
Gracias a la suma limpieza del ambiente de la cámara obtenida por estos procedimientos, el horno puede trabajar a temperaturas muy inferiores a las utilizadas en la epitaxia habitual. Nuestro grupo de IBM ha descubierto que unas temperaturas de 400 a 500 ºC son suficientes para preparar películas de silicio y de aleación silicio-germanio de elevada calidad.

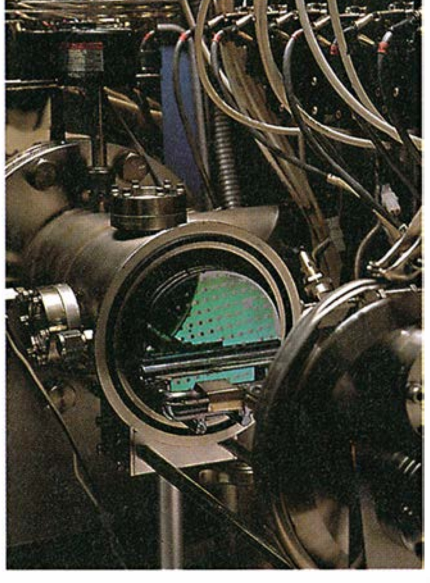
La posibilidad de fabricar una heterounión a temperaturas moderadas permite crear pastillas refinadas y flexibles. Por ejemplo, puede hacerse crecer la capa de silicio-germanio sobre una oblea de silicio ya configurada en todas las regiones químicas adecuadas a los dispositivos electrónicos que finalmente va a llevar la pastilla. Merced a tales patrones químicos impresos, podrá obtenerse una pastilla con densidad excepcionalmente alta de transistores u otros dispositivos. Las temperaturas que emplea la epitaxia tradicional distorsionarían cualquier patrón preexistente.

En 1988, tras haber desarrollado gran parte del proceso de deposición antes referido, empecé a colaborar con otros especialistas en una tarea más ambiciosa: construir mediante dicho proceso transistores bipolares manejables y de alta velocidad.

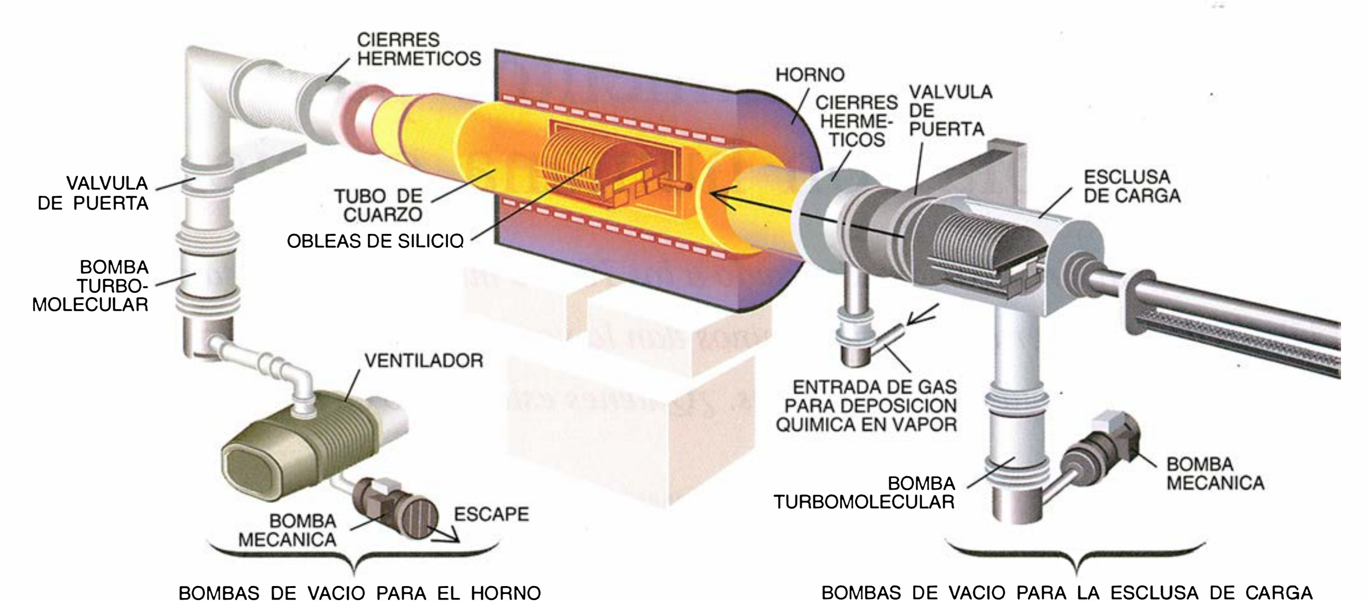
Comenzamos por utilizar la epitaxia a baja temperatura para construir homouniones de silicio puro. Estos dispositivos funcionaron: nuestra técnica era correcta. A partir de 1989, se fabricaron en IBM los primeros transistores bipolares que materializaban el concepto de Kroemer: la heterounión progresiva entre silicio y silicio-germanio. Aunque la aleación tenía menos del 4 % de germanio, dichos transistores superaban ya las capacidades atribuidas a la tecnología del silicio. Su campo eléctrico inherente (unos 30.000 volts por centímetro a través de la base) aceleraba los electrones hasta el punto de que el tiempo invertido en atravesar la base se reducía a la mitad del requerido en los transistores de silicio sin alear.

Una medida normal del comportamiento de un transistor bipolar viene dada por la dependencia que muestra su ganancia (relación de la corriente conmutada por el transistor a la corriente que se necesita para activarlo) con respecto a la frecuencia de conmutación. En una aplicación típica





4. VELOCIDADES DE CONMUTACION de los transistores bipolares de silicio; han aumentado con los años (*izquierda*). La técnica del silicio-germanio acelera esa tendencia y alcanza niveles de prestación que con el silicio se creían irrealizables. Un novedoso sistema de crecimiento cristalino (*derecha*) ha convertido esta técnica en realidad.



5. TECNICA DE CRECIMIENTO CRISTALINO ideada por el autor. Evita las devastadoras, por elevadas, temperaturas de los métodos anteriores. Las bombas de vacío, válvulas especiales y juntas herméticas impiden la entrada de contaminantes en el horno, en el cual se deposita la aleación de silicio-germanio sobre las obleas de silicio. El proceso de deposición se produce en un vacío casi absoluto, con mínimas concentraciones de átomos extraños que puedan alterar la operación electrónica correcta.

de un ordenador, el transistor bipolar podría tener una ganancia en torno de 100. A mayores frecuencias de conmutación, la ganancia va cayendo progresivamente. Cuando la ganancia cae a uno, el transistor pierde su razón de ser porque entrega una corriente igual a la corriente que se le introduce para activarlo, y entonces funciona como un sencillo hilo conductor.

La velocidad del transistor puede calibrarse por la rapidez con que puede conmutarse a uno y otro estado, antes de que su ganancia caiga a uno. Las primeras heterouniones progresivas que construimos en 1989 conmutaban a 75 gigahertz (miles de millones de ciclos por segundo), casi el doble de la velocidad de los dispositivos de silicio más rápidos comparables. Posteriores trabajos en IBM han hecho avanzar las heterouniones hasta velocidades de 110 a 117 gigahertz, un nivel que se consideraba imposible de alcanzar con silicio. En pruebas de revisión mis colegas y yo hemos incorporado esos dispositivos en circuitos completos que funcionaron a velocidades hasta entonces nunca conseguidas; la prueba era crucial, pues los transistores de alta velocidad suelen ser mucho menos rápidos en condiciones prácticas, cuando forman parte de circuitos reales.

Tales circuitos llegan ahora al mercado gracias a IBM y Analog Devices. Esta última compañía anunció el año pasado, en la reunión internacional sobre dispositivos electrónicos celebrada en Washington, que pronto empezaría a vender circuitos basados en silicio-germanio, entre ellos un conversor digital-analógico, pieza clave de la electrónica casera. Este conversor de silicio-germanio transforma datos numéricos en corrientes electrónicas a la velocidad récord de mil millones de conversiones por segundo. Con ello iguala la velocidad de los más rápidos conversores fabricados con uniones de arseniuro de galio, pero consumiendo solamente una fracción de la potencia que éstos requieren.

La aparición de un circuito integrado de silicio-germanio comercial marca un hito en la búsqueda de medios para mejorar las prestaciones que no se basen en la miniaturización. En Analog Devices se barajan otras aplicaciones del silicio-germanio; por ejemplo, teléfonos inalámbricos digitales capaces de manejar un flujo de datos de inusitada rapidez. Es conocido el papel esencial de los conversores digital-analógico en la traducción de datos digitales recibidos por fibra óptica en señales analógicas destinadas al teléfono o la televisión; cuanto antes se disponga de unos conversores muy rápidos, antes llegarán al hogar y a la empresa las redes digitales de datos. También serán indispensables en equipos portátiles de comunicación, de uso cada vez más difundido.

La tecnología del silicio-germanio está todavía en pañales. Para aprovechar la velocidad de los nuevos dispositivos han de modificarse multitud de diseños de circuito existentes. Hasta ahora IBM es la única compañía que ha demostrado tener capacidad para integrar en circuitos un número apreciable de transistores bipolares de alta prestación basados en heterounión. Nuestro grupo ha demostrado que los materiales de silicio-germanio pueden mejorar también el comportamiento de los transistores de efecto de campo, pero no se han integrado esos dispositivos en circuitos más amplios. Andando el tiempo, la tecnología deberá abrir paso a la combinación de múltiples funciones (transmisión, conversión de señales, recepción) en una sola pastilla. De esa manera, podrían hacerse realidad muchas fantasías como los televisores interactivos en forma de reloj de pulsera.

Leybold-A. G. comenzó recientemente a fabricar una versión comercial de nuestro aparato de deposición química en vapor al vacío ultra-alto. Una vez que ya se tiene un equipo estándar con el que trabajar, los ingenieros pueden concentrarse en el desarrollo de circuitos cada vez más complejos y en buscar caminos para ampliar la gama de dispositivos de heterounión silicio-germanio susceptibles de combinarse en una sola pastilla.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES. S. M. Sze. Wiley Interscience, 1981.

EVOLUTION OF THE MOS TRANSISTOR: FROM CONCEPTION TO VLSI. Chih-Tang Sah en *Proceedings of the IEEE*, volumen 76, número 10, páginas 1280-1326; octubre de 1988.

UHV/CVD GROWTH OF SILICON AND SILICON-GERMANIUM ALLOYS: CHEMISTRY, PHYSICS, AND DEVICE APPLICATIONS. Bernard S. Meyerson en *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, n.º 10, págs. 1592-1608; octubre de 1992.

¿Habrá alimentos para una población humana creciente?

A medida que nos vamos acercando a los 10.000 millones de habitantes, los juicios de los expertos se dividen; unos dan la voz de alarma, en tanto que otros se muestran optimistas. ¿Quiénes están en lo cierto?

John Bongaarts

Los demógrafos prevén la duplicación de la población mundial de aquí a cincuenta años, cuando se pase de los 5300 millones de habitantes que había en 1990 a los 10.000 millones que habrá en el año 2050. ¿Cómo responderán el ambiente y la humanidad a este crecimiento sin precedentes? La opinión de los expertos está dividida en dos fracciones. Los ecologistas, cuyas opiniones han sido ampliamente difundidas por los medios de comunicación, consideran la situación una catástrofe en ciernes; para alimentar a la creciente población, dicen, los agricultores deberán intensificar unas prácticas que están causando ya graves daños al entorno. Los recursos naturales y el ambiente, exhaustos ahora por el crecimiento demográfico de antaño, se derrumbarán bajo el peso de la demanda del futuro.

Por otro lado, los optimistas, entre ellos muchos economistas y algunos agrónomos, sostienen que la Tierra es capaz de producir sin estragos alimento más que suficiente para la población prevista en el año 2050. Las innovaciones de la técnica y la inversión continua de capital humano traerán mejores niveles de vida a gran parte del globo, aun cuando la población sobrepase con mucho los 10.000 millones estimados por la proyección demográfica. ¿Quién tiene razón?

Temen los ecologistas que la oferta de alimento se encuentre ya en precario. En esa idea militan Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich, de la Universidad de Stanford. A largo plazo, según los Ehrlich y expertos de igual parecer, es imposible un crecimiento sustancial de la producción de alimentos. "Nos estamos alimentando a expensas de nuestros hijos. Por definición, los campesinos pueden sobreexplotar la tierra y los acuíferos sólo a corto plazo. Plazo que para muchos ya está tocando a su fin", afirma Lester R. Brown, presidente del Instituto Worldwatch.

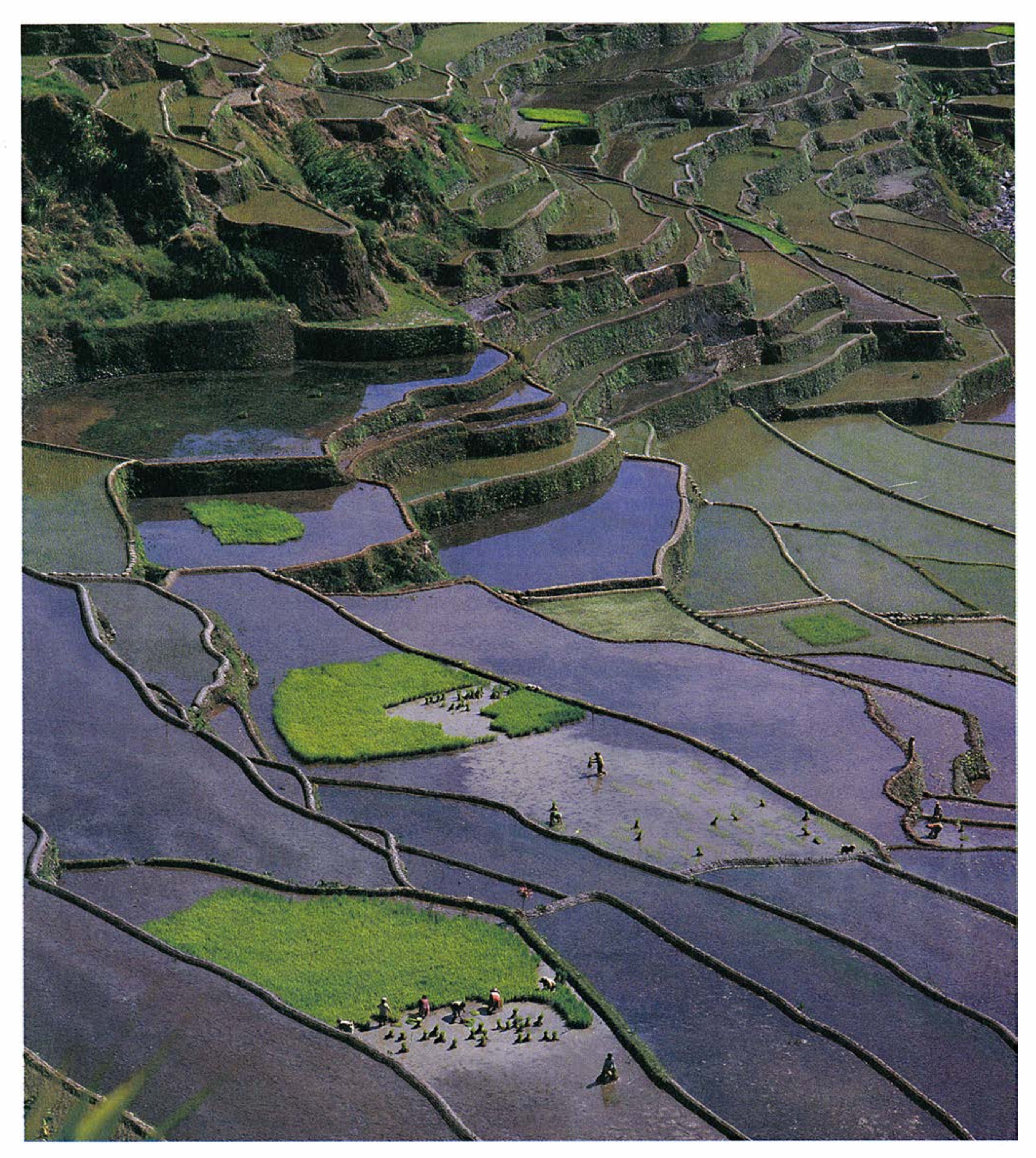
En los tres últimos decenios, indican estos autores, se han aunado enormes esfuerzos y recursos para intensificar el rendimiento agrícola. A lo largo de ese intervalo se ha experimentado incluso un aumento espectacular de las cosechas. En el mundo subdesarrollado, la producción de alimento se elevó una media de un 117 por ciento desde 1965 hasta 1990. El rendimiento de Asia fue mucho mejor que el de otras regiones, que vieron incrementos por debajo de la media.

Pero también la población ha crecido. Y así la producción alimentaria per cápita ha conocido sólo un cambio modesto; en Africa disminuyó incluso. Así pues, en la mayoría de los países subdesarrollados sigue aumentando el número de personas infraalimentadas, aunque haya habido un descenso de 844 millones a 786 durante la década de los ochenta. Descenso que, sin embargo, sólo es reflejo de mejores condiciones nutricionales en Asia: durante el mismo período hubo una escalada del número de personas alimentadas con dietas bajas en calorías en Iberoamérica, el Próximo Oriente y Africa.

Aunque son muchos los factores sociales que contribuyen al hambre, los pesimistas subrayan el papel de la presión demográfica sobre los frágiles ecosistemas. En particular, parece que estamos a punto de quedarnos sin suelo cultivable. Si es así, no servirán de mucho los esfuerzos por intensificar la producción alimentaria per cápita ganando a los bosques más tierra fértil. Entre 1850 y 1950 hubo un rápido incremento de la cantidad de suelo cultivado para ajustarse al crecimiento de la población y a la mayor demanda de mejores dietas. Luego, aminoró esa expansión hasta detenerse a finales de la década de 1980. En el mundo desarrollado, y en algunos países en vías de desarrollo (China sobre todo), la cantidad de tierra de labranza empezó a disminuir durante los años ochenta. Este descenso se debió a la expansión de los centros urbanos, que fueron ocupando tierras fértiles, pero obedeció también al abandono campesino de la tierra, una vez esquilmada. Los agricultores han ido dejando campos de regadío que la acumulación de sal tornó improductivos.

Los ecologistas añaden que la erosión del suelo está destruyendo los campos abandonados. Se discute sobre el alcance de ese daño. Una reciente evaluación mundial, patrocinada por el Programa Ambiental de Naciones Unidas y realizada por el Instituto de Recursos Mundiales y otros, arroja alguna luz. En el estudio se concluye que el 17 por ciento de la tierra mundial que sustenta la vida vegetal ha perdido valor durante los últimos 45 años. En el cálculo se incluye la erosión causada por el agua y el viento, así como el deterioro químico y físico; y se clasifica el grado de degradación del suelo de leve a grave. La degradación es menor en Norteamérica (5,3 por ciento) y más generalizada en América central (25 por ciento), Europa (23 por ciento), Africa (22 por ciento) y Asia (20 por ciento). En casi todas estas regiones, el campesino medio

JOHN BONGAARTS, vicepresidente del Consejo de Población de Nueva York desde 1989, ha recibido numerosos galardones por su dilatada investigación en el campo de la demografía y el desarrollo.

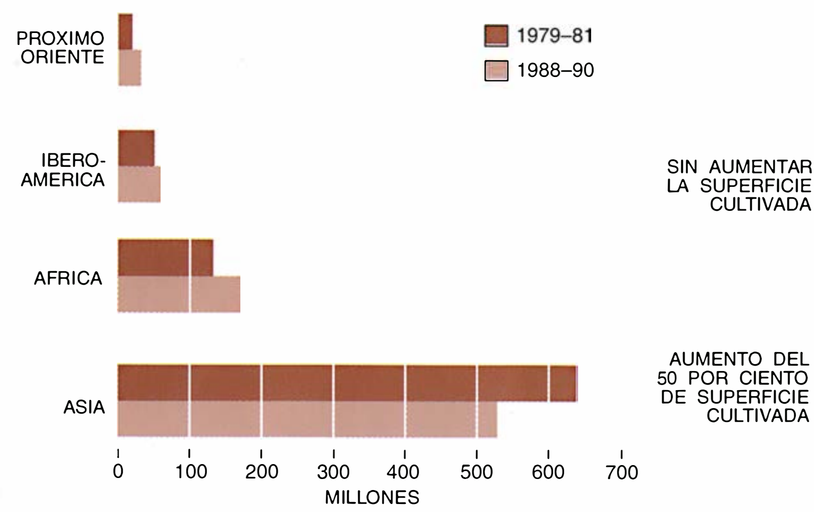


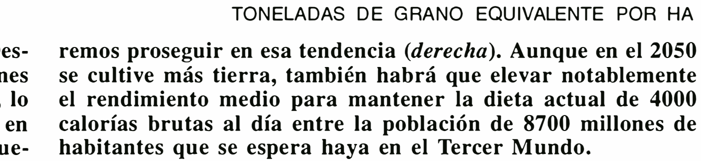
1. LOS ARROZALES (de Indonesia en este caso) proporcionan el alimento principal a más de la mitad de la población mundial. En muchas partes de Asia, el terreno impide la mecanización del campo; la siembra y recolección de media hectárea puede exigir más de 1000 horas-hombre. No obstante, los países asiáticos producen ahora más del 90 por ciento del arroz.

no dispone de los recursos necesarios para restablecer la productividad de las zonas donde el daño es moderado o grave. Por tanto, las perspectivas para invertir los efectos de la erosión del suelo no son nada halagüeñas, y es probable que el problema empeore.

Pese a la pérdida y degradación del suelo, la "revolución verde" ha promovido la producción de alimento per cápita incrementando el rendimiento por hectárea. Desde su introducción en los años sesenta, se han propagado nuevas variedades de cereales (trigo y arroz, por ejemplo) de elevado rendimiento, sobre todo en Asia; mas para sacarles su máxima ventaja, los campesinos deben emplear agua y abono en grandes cantidades.

Los ecologistas dudan de que se consiga una mayor conversión a estos cultivos a un coste razonable, sobre todo en el mundo subdesarrollado, donde resulta más imperioso aumentar la producción. Por ahora,





2. INCIDENCIA DE LA DESNUTRICION CRONICA. Descendió en los países en vías de desarrollo desde 844 millones de víctimas calculadas en 1979 hasta 786 millones en 1990, lo que muestra indicios de una notable mejora nutricional en Asia (*izquierda*). Debe aumentar el rendimiento agrícola si queremos proseguir en esa tendencia (*derecha*). Aunque en el 2050 se cultive más tierra, también habrá que elevar notablemente el rendimiento medio para mantener la dieta actual de 4000 calorías brutas al día entre la población de 8700 millones de habitantes que se espera haya en el Tercer Mundo.

los campesinos de Asia, Iberoamérica y Africa a duras penas utilizan los fertilizantes, caros, si es que disponen de ellos. En el mundo desarrollado disminuye el uso de los abonos por razones complejas y, quizá, transitorias; los agricultores norteamericanos y europeos no creen que mejorarán más sus cosechas si aumentan la ración de fertilizantes, ya de por sí intensa.

Muy cara suele ser también para muchos países la instalación de sistemas de regadío, que les permitiría sumarse a la revolución verde. Y en casi todos ellos, el riego es esencial para generar mayores cosechas. Fecunda la tierra árida y protege a los campesinos de la vulnerabilidad ante las oscilaciones climatológicas naturales. La tierra puesta así en rendimiento podría destinarse para varias siembras, con el aumento consiguiente de producción de alimento.

Estas ventajas han quedado patentes desde el origen de la agricultura: los sistemas de riego primitivos se remontan miles de años atrás. En el mundo subdesarrollado, sin embargo, sólo se riega una fracción de la tierra productiva, y su progresión ha avanzado más despacio que el crecimiento demográfico. O lo que es lo mismo, a lo largo de los últimos decenios ha ido menguando el suelo de regadío per cápita. Será difícil frenar esta tendencia, argumentan los pesimistas: los sistemas de riego se han construido en los lugares más asequibles y la esperanza de extenderlos se ve limitada por los costes. Además, cada vez es más caro evitar o invertir la acumulación de sal y de aluviones en canales y pantanos que abastecen los regadíos actuales.

Según los Ehrlich, la agricultura moderna está, por su propia naturaleza, en peligro. La uniformidad genética de los monocultivos de alto rendimiento en grandes extensiones las hace muy productivas, pero también vulnerables a las plagas. Las medidas de prevención, como la diseminación de plaguicidas y los cultivos rotatorios, son meras soluciones parciales; los patógenos de evolución rápida plantean un desafío continuo. Por eso, los dedicados a la mejora vegetal deben mantener un amplio arsenal genético, reuniendo y almacenando variedades naturales y creando otras nuevas en el laboratorio.

Los optimistas no niegan la existencia de problemas en el sistema de provisión de alimentos. Pero muchos, entre ellos D. Gale Johnson, Walter R. Brown, L. Martel, Vaclav Smil y Julian L. Simon, creen que puede crecer de forma espectacular la oferta alimentaria. Por ironía de las cosas, fundan su entusiasmo en la extrapolación de las tendencias que alarman a los que pronostican el desastre. Las estadísticas muestran que la ingesta calórica media per cápita al día ascendió en un 21 por ciento (de 2063 calorías a 2495) entre 1965 y 1990 en los países subdesarrollados. Mayor cantidad de calorías que, en general, comporta un mayor aporte proteico: como media, el consumo per cápita de proteínas se elevó desde 52 gramos por día hasta 61 entre 1965 y 1990.

Para los optimistas, no sólo ha mejorado la situación alimentaria mundial en los últimos decenios, sino que es posible un crecimiento ulterior en distintos frentes. Una valoración detallada de las condiciones climáticas y edáficas reinantes en 93 países en vías de desarrollo (salvo China) demuestra que la tierra de labranza podría casi triplicarse y transformarse en cultivo otros 2100 millones de hectáreas más. Por regiones, Africa subsahariana e Iberoamérica podrían roturar mayor superficie de tierra inutilizada que Asia, el Próximo Oriente y norte de Africa.

Incluso en regiones de limitada superficie cultivable podrían sembrarse varias cosechas más al año. Ocurre así en los trópicos y zonas subtropicales donde las condiciones —temperatura uniforme durante todo el año y distribución constante de las horas de luz— permiten más de una cosecha.

Además de la diversificación de los cultivos, se puede conseguir mayor rendimiento de cada cosecha, en especial en Africa y el Próximo Oriente. En el Primer Mundo es donde se cosecha más por hectárea: la producción media de cereales en Norteamérica y Europa es de 4,2 toneladas por hectárea, 2,9 en el Extremo Oriente (4,2 en China), 2,1 en

Iberoamérica, 1,7 en el Próximo Oriente y sólo 1,0 en Africa.

Puede obtenerse ese mayor rendimiento, observan los entusiastas, fomentando el uso de razas mejoradas, abonos y riego. En *World Agriculture: Toward 2000*, Nikos Alexandratos, de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas, afirma que, de todas las semillas plantadas a mediados de los ochenta, sólo el 34 por ciento correspondía a variedades de alto rendimiento. Las estadísticas de la FAO demuestran que sólo una de cada cinco hectáreas de tierra de labranza es de regadío, y que los abonos y los plaguicidas se emplean muy poco. Bastaría con generalizar esos recursos para multiplicar la producción de alimento.

Aparte de producir más alimento, señalan economistas y agrónomos, podrían incrementarse los niveles de consumo en el tercer mundo si se desperdiciaran menos cosechas y se redujeran las pérdidas por almacenamiento y distribución. ¿Qué significarían estas medidas? Robert W. Kates, director de la Universidad Brown, indica que la humanidad

Efectos del calentamiento mundial sobre la agricultura

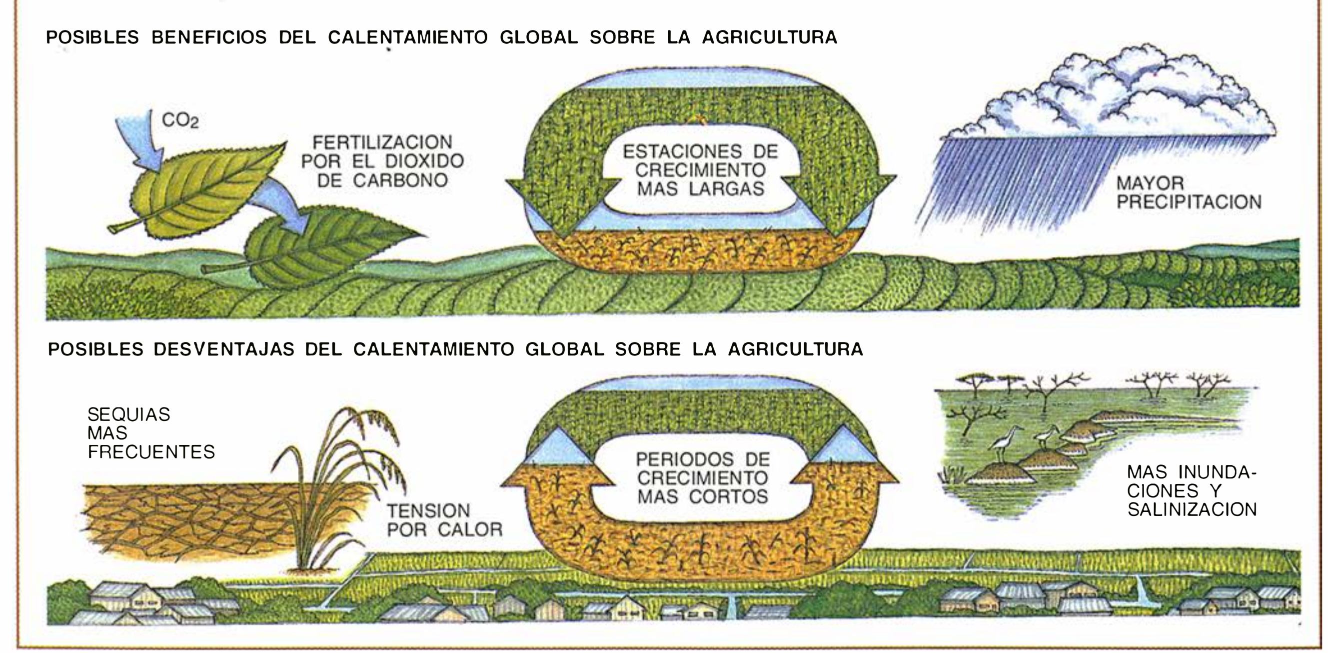
Los datos sobre el efecto invernadero indican que es muy probable un calentamiento mundial, lento aunque significativo, si sigue aumentando la emisión de dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno y halocarburos. La agricultura es responsable directa o, al menos en algunos casos, indirecta de la liberación de una parte sustancial de esos gases. La respuesta política ante las consecuencias potencialmente adversas del cambio climático global se concentra en dificultar las emisiones, más que en suspenderlas. Pero, considerando la necesidad de mejorar el nivel de vida y producir más alimento para una población creciente, se duda que sea factible siquiera una reducción de las emisiones en un futuro inmediato.

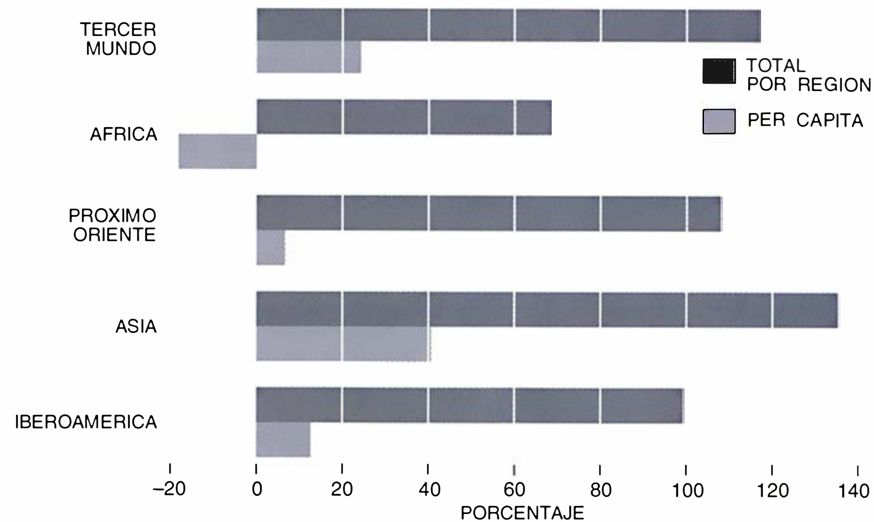
En un estudio de 1990 el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático calculó que, durante el próximo siglo, la temperatura media experimentará un ascenso de tres grados Celsius. El estudio supone que la agricultura crecerá. El efecto que tendrá la elevación de la temperatura, sea ésta cual sea, sobre la sociedad humana constituye una cuestión abierta.

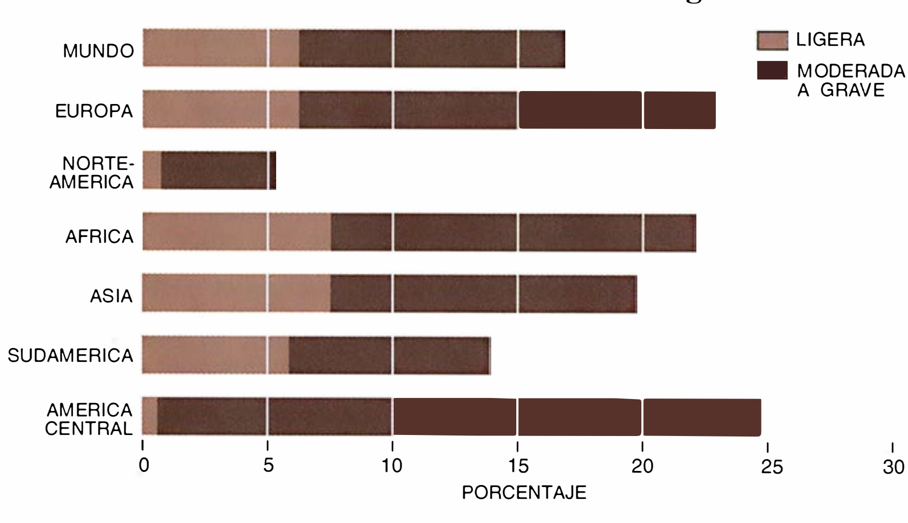
El calentamiento podría intensificar o dificultar la agricultura, según Cynthia Rosenzweig, de la Universidad de Columbia, y Martin L. Parry, de Oxford. Con suficiente agua y luz, las mayores concentraciones de dióxido de carbono ambientales absorbidas durante la fotosíntesis podrían actuar como fertilizante y facilitar el crecimiento de ciertas plantas. Además, al ampliar el tiempo entre los últimos hielos de la primavera y los primeros del otoño, el calentamiento beneficiará a la agricultura en las regiones frías, donde la estación de crecimiento es corta. El aire más caliente contiene más vapor de agua, de modo que el calentamiento global producirá más evaporación y precipitaciones. Areas donde la producción de los cultivos está limitada por condiciones áridas se beneficiarían de un clima más húmedo.

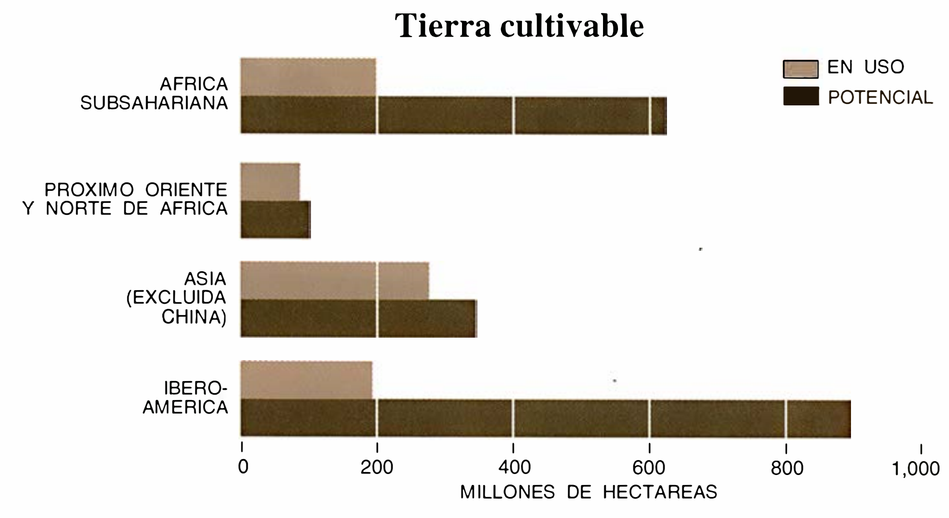
Ahora bien, si la mayor evaporación del suelo y las plantas en una región no coincide con más precipitaciones, habrá períodos secos y sequías frecuentes. La elevación ulterior de la temperatura reducirá la producción de los cultivos en las áreas tropicales y subtropicales, donde ciertos cultivos se están acercando a su límite de tolerancia al calor. Además, algunos cultivos de cereales necesitan las bajas temperaturas invernales para iniciar la floración. Inviernos más calientes en las regiones templadas podrían interrumpir los períodos de desarrollo y producir menores cosechas. Por último, el calentamiento global precipitará la expansión térmica de los océanos y la fusión del hielo polar. La subida del nivel del mar inundará las tierras bajas y aumentará la concentración salina en el agua subterránea costera.

Las técnicas utilizadas para crear modelos climáticos no están lo bastante avanzadas como para predecir el equilibrio de estos efectos en áreas específicas. De acuerdo con el análisis más reciente del efecto que el cambio climático tendrá sobre la provisión de alimento en el planeta, realizado por Rosenzweig y Parry en 1992, la producción mundial media de alimento disminuirá un 5 por ciento en el 2060. En este análisis se pronostica una caída algo mayor en el mundo subdesarrollado, agravando así los problemas que surgirán, se espera, a la hora de alimentar a una población cada vez mayor. Por el contrario, el informe prevé un ligero aumento de la producción agrícola en los países desarrollados situados en latitudes medias o altas.









3. PRODUCCION TOTAL DE ALIMENTOS: se elevó casi un 120 por ciento entre 1965 y 1990 en el mundo subdesarrollado, aunque fuera de Asia la producción per cápita cambió poco (*arriba*). La erosión del suelo ha degradado gran parte de la superficie dedicada a cultivo (*centro*). Pero muchas naciones del Tercer Mundo disponen de vastas extensiones que podrían dar un rendimiento satisfactorio si se empleasen más agua y fertilizantes (*abajo*).

consume sólo el 60 por ciento de lo recolectado y que un 25 o 30 por ciento se pierde antes de llegar a los hogares. La FAO, por otro lado, calcula menos pérdidas por distribución: un 6 % para los cereales, un 11 % para los tubérculos y un 4 % para las legumbres. No cabe duda de que con sistemas de almacenamiento y distribución más eficaces se aprovecharían mejor los alimentos, con independencia de la capacidad futura de producción.

Para los optimistas, la tendencia a largo plazo de los precios alimentarios constituye la prueba más sólida de su hipótesis. En 1992-93 el Instituto de Recursos Mundiales publicó que los precios estaban por debajo de los correspondientes a la mayoría de los artículos no derivados del petróleo, que habían disminuido a lo largo de los diez últimos años. En el mercado internacional, los precios de los cereales cayeron un tercio entre 1980 y 1989, rebaja que atribuyen a la subvención gubernamental a la agricultura en Norteamérica y Europa occidental y los consiguientes excedentes agrarios. La oferta, sostienen los optimistas, excede ya la demanda de una población mundial que se ha duplicado desde 1950.

Todo esto les lleva a no ver obstáculos significativos contra la elevación de los niveles nutricionales de una población mundial que sobrepase los 10.000 millones de personas. Existe el potencial para la expansión de la producción de alimentos, pero su materialización depende de la aplicación de políticas inteligentes, de la intensificación del comercio nacional e internacional y de grandes inversiones en infraestructura y colonización agraria. Lo que puede conseguirse, creen los optimistas, sin incurrir en daños irreparables para los ecosistemas mundiales.

Los defensores de una u otra de estas dos perspectivas antagónicas tienen dificultad para aceptar la existencia de otros puntos de vista plausibles. Además, la polaridad entre los dos enfoques pone de manifiesto que ninguno de los grupos está en posesión absoluta de la verdad. Encontrar puntos en común entre estas posiciones aparentemente irreconciliables no es tan difícil como parece, si se acentúan los aspectos empíricos y se hace caso omiso de las diferencias relativas a los sistemas de valores y los credos políticos.

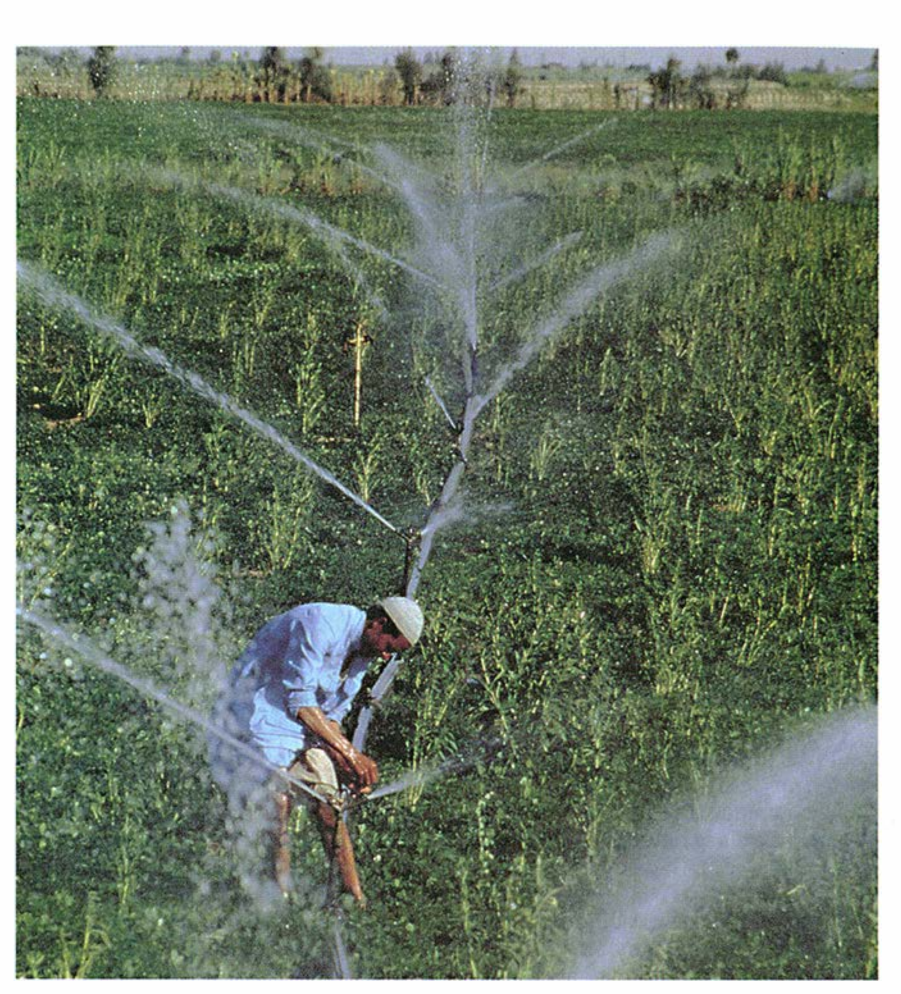
Ambas partes coinciden en que la demanda de alimento crecerá rápidamente durante los decenios venide-

ros. En 1990, los habitantes del Tercer Mundo ingerían una media de 2500 calorías al día, de un total de 4000 calorías brutas procedentes de los cultivos a los que tenían acceso. Las otras 1500 calorías se perdían, no eran comestibles o se destinaban al engorde animal y simientes. Casi todo este alimento se cosechaba en los 700 millones de hectáreas cultivadas en los países en vías de desarrollo, salvo un 5 % que procedía de las importaciones. Para mantener esa dieta de 4000 calorías en una población tercermundista que, en el 2050, doblará de lejos el censo actual (8700 millones de personas), debe producirse un aumento del 112 % de los cultivos. Para elevar esa dieta media hasta 6000 calorías brutas al día, ligeramente por encima de la media mundial de 1990, la producción alimentaria tendría que incrementarse en un 218 %. Y para que esa dieta fuera comparable a la consumida hoy en el mundo desarrollado, 10.000 calorías brutas al día, dicha producción de alimento habría de elevarse en un 430 %.

Se conseguirá una provisión más generosa de alimentos en el futuro estimulando el rendimiento de los cultivos, como ocurrió en el pasado. Si en el mundo subdesarrollado se mantiene la superficie cultivada en 700 millones de hectáreas, cada hectárea deberá aumentar en más del doble la producción para mantener una dieta ya inadecuada para su futura población. Proporcionar una dieta equivalente a la media ingerida en el Primer Mundo en 1990 exigiría que cada hectárea sextuplicara su rendimiento, algo virtualmente imposible en el Tercer Mundo, salvo que la biotecnología diera un paso de gigante en la producción de alimentos.

Los campesinos no dudarán en roturar más hectáreas y sembrar más cosechas por año en la misma tierra para aumentar la producción. La extrapolación de las tendencias pasadas indica que la superficie recolectada total habrá crecido en torno a un 50 por ciento para el año 2050. Cada hectárea habrá proporcionado entonces casi un 50 por ciento más de toneladas de cereales o su equivalente para procurar mantener los niveles de la dieta actual. Dietas mejores sólo pueden obtenerse con cosechas mucho mayores.

Los optimistas tecnológicos están en lo cierto al afirmar que la producción de alimento mundial puede experimentar un sustancial incremento durante los próximos decenios.



4. LOS AGRICULTORES EGIPCIOS, aconsejados por los agrónomos israelíes, han convertido más de 162.000 hectáreas de desierto en campos de labor instalando sistemas de regadío. Nubariya produce ahora abundantes cosechas de fruta.

Las cosechas actuales están muy por debajo de su máximo teórico y sólo se trabaja alrededor del 11 por ciento de la tierra cultivable. Además, la experiencia recién adquirida en China y otros países nos enseña importantes lecciones sobre cómo aprovechar este potencial: la productividad agrícola responde a las políticas bien diseñadas que prestan ayuda a los campesinos suministrándoles el abono necesario y otros medios, creando infraestructuras y facilitándoles el acceso al mercado. Más inversión en investigación agrícola engendrará nuevas tecnologías que fortalecerán la agricultura del futuro. La cuestión vital no es, por tanto, cómo cultivar más, sino cómo poner en práctica métodos que estimulen la producción alimentaria.

Un problema espinoso es el de lograr ese avance tecnológico sin que se resienta el entorno. Aquí, las razones de los pesimistas adquieren considerable peso. Sin la menor duda, la tierra cultivada hoy es, en general, de mejor calidad que la tierra potencialmente cultivable, sin roturar. Asimismo, los sistemas de regadío están construidos en los lugares más favorables. Por consiguiente, la puesta en práctica de toda nueva medida orientada a intensificar las cosechas es cada vez más cara, en los países desarrollados y en ciertas partes de los subdesarrollados donde, como China, la productividad es ya alta. Tales limitaciones encarecen el coste marginal de cada tonelada extra de cereal o su equivalente. Esta carga es incluso mayor si se tienen en cuenta los costes externos negativos —fundamentalmente los ambientales no reflejados en el precio de los productos agrarios.

El precio ambiental de esas transformaciones puede ser alto. Probablemente, el primar la agricultura para proporcionar mejores dietas a la creciente población se traduzca en una deforestación generalizada, pérdida de especies, erosión y contaminación del suelo con plaguicidas, sin olvidar los procesos de escorrentía de los abonos, conforme se intensifica el trabajo agrícola y se incre-



5. ORDENADOR INCORPORADO AL CUADRO DE MANDOS de un tractor, en el que los mapas recopilados vía satélite ayudan a los agricultores a analizar el suelo y emplear las cantidades y las mezclas de fertilizante específicas para cada zona. Esta tecnología ahorra dinero y aumenta el rendimiento.

menta la tierra productiva. Reducir o minimizar ese efecto ambiental es posible, aunque costoso.

Ante tamaña gavilla de interrogantes se hace difícil calcular el curso de los precios de la alimentación. Como mínimo, la elevación del coste marginal de la producción alimentaria engendrará en el mercado internacional precios más altos de los fijados de no existir limitaciones ambientales. Queda por ver si estos mayores costes van a compensar el descenso histórico de los precios. Entra dentro de lo posible, en un futuro inmediato, la tendencia ascendente del precio del alimento. Este ascenso se verá mitigado por el desarrollo continuo y la aplicación de nuevas técnicas, así como por la probable recuperación de la agricultura y las exportaciones en la antigua Unión Soviética, Europa Oriental e Iberoamérica. Además, según indica Per Pinstrup-Andersen, de la Universidad de Cornell, todo incremento futuro del precio podría reducirse aprovechando los recursos agrícolas norteamericanos ahora infrautilizados. La elevación de los precios se dejará sentir en la economía de los pobres.

El futuro de la producción mundial de alimentos no es tan horrible como los pesimistas creen, ni tan rosado como lo pintan los optimistas. Parece más plausible que la ingesta aumente poco a poco en casi todas las regiones. Asistiremos, sin duda, a fluctuaciones anuales de la disponibilidad y los precios del alimento; el clima, la interrupción de relaciones comerciales y la vulnerabilidad de los monocultivos a las plagas, entre otros factores, pueden alterar la oferta. Se conseguirá la expansión de la agricultura estimulando cosechas rentables, aprovechando mejor la tierra cultivada y roturando nuevos suelos. Pero todo ello sucederá a un ritmo mucho más lento que en el pasado, obligados por las limitaciones ambientales. Por otro lado, la demanda de alimentos en el mundo desarrollado está aproximándose a los niveles de saturación. En EE.UU. la preocupación por la salud ha hecho que el consumo per cápita de calorías de origen animal decaiga.

Con todo, el progreso distará mucho de ser uniforme. Habrá países que lucharán por superar sus niveles de nutrición, insatisfactorios. Pertenecen a tres categorías principales. Algunas naciones de renta baja tienen pocas reservas, o ninguna, de tierra fértil y agua. La ausencia de recursos agrícolas no es en sí misma un problema insuperable, como se ha demostrado en Hong Kong y Kuwait, que compran sus alimentos en el mercado internacional. Pero muchos países pobres, como Bangladesh, no pueden permitírselo y compensar así sus menguados recursos; dependerán, pues, de la ayuda exterior.

También se encuentran bajos niveles de nutrición en el Zaire y otros países que cuentan con grandes reservas de agua y tierra potencialmente arable. La negligencia gubernativa y los fracasos políticos son responsables de la pobreza de la dieta de sus habitantes. En un reciente informe del Banco Mundial se describen los perjudiciales efectos de los impuestos directos e indirectos a la agricultura, del control de los precios y el acceso al mercado, y de la sobrevaloración de la moneda, medidas que desalientan las exportaciones y fomentan las importaciones. Donde la producción agrícola adolece de la intervención equivocada del gobierno, la solución es clara: la reforma política.

La ayuda alimentaria será necesaria también en áreas sumidas en la inestabilidad y la guerra civil. Las hambrunas más devastadoras de los últimos diez años han ocurrido en Etiopía, Somalia y Sudán, inmersas en luchas fratricidas prolongadas. En muchos de esos casos, la sequía contribuyó a la agitación social y desorden político, pero la adición del conflicto violento impidió la recuperación de la agricultura y la distribución de alimento, convirtiendo así situaciones malas, pero remediables, en desastres. La intervención militar internacional, como en Somalia, constituye sólo un remedio a corto plazo. Sin estabilidad política, el hambre y la desnutrición seguirán siendo endémicas en estas regiones destrozadas por la guerra.

Dar una dieta mejor en calidad y cantidad a una población mundial creciente es tecnológicamente factible. Pero los costes económicos y ambientales en los que se incurre al intensificar la producción resultarán, a buen seguro, demasiado onerosos para muchos países pobres. El rumbo que tomen los acontecimientos dependerá de la capacidad de sus gobiernos para diseñar y poner en práctica políticas eficaces que aborden los retos planteados por el número cada vez mayor de seres humanos, el aumento de la pobreza y la degradación ambiental. Cualquiera que sea el efecto, la tarea que nos espera resultará más difícil si no conseguimos reducir los índices de crecimiento de la población.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POVERTY AND HUNGER: ISSUES AND OPTIONS FOR FOOD SECURITY IN DEVELOPPING COUNTRIES. Banco Mundial, 1986.

ENERGY, FOOD, ENVIRONMENT: REALITIES, MYTHS, OPTIONS. Vaclav Smil. Clarendon Press, 1987.

WORLD AGRICULTURE: TOWARD 2000. Nikos Alexandratos. New York University Press, 1988.

WORLD RESOURCES 1992-93. World Resources Institute. Oxford University Press, 1992.

Sustitución dirigida de genes

La biología de los mamíferos está experimentando una auténtica revolución, impulsada por una nueva técnica que permite crear ratones portadores de mutaciones controladas de cualquier gen conocido

Mario R. Capecchi

Las células de nuestro organismo portan en el núcleo un manual de instrucciones donde se especifican sus distintas funciones. Aunque ese manual es el mismo para todas, cada estirpe celular —hepáticas, epidérmicas y otras— echa mano de un capítulo diferente para cumplir su propia misión. El manual contiene, asimismo, la información en cuya virtud un embrión unicelular, el óvulo fecundado, se convierte, primero, en feto y, luego, en bebé. Y además sigue suministrando información mientras el niño madura física e intelectualmente. Cada uno de nosotros es irrepetible; en efecto, el manual difiere ligeramente de un sujeto a otro, de suerte que en él están especificadas casi todas las características físicas y muchas de las claves del comportamiento que nos individualizan.

Manual tan extraordinario se llama genoma. Está escrito en forma de nucleótidos, con un alfabeto de cuatro letras: adenilato (*A*), citidilato (*C*), guanilato (*G*) y timidilato (*T*). Igual que la secuencia de letras de una palabra determina su significado, así la secuencia de nucleótidos del ADN encierra la información. En cada división celular se replica el manual entero: una copia por cada célula resultante. En humanos y ratones, el genoma viene a constar de unos tres mil millones de nucleótidos.

Con mi grupo de la Universidad de Utah he desarrollado la técnica que permite cambiar una letra, una frase o varios párrafos del manual de instrucciones de las células de un ratón. Reescribiendo partes del texto y evaluando las consecuencias de esa alteración de las instrucciones sobre el desarrollo del múrido, o sobre su operación posterior, podemos desentrañar las peculiaridades del programa que gobierna dichos procesos.

MARIO R. CAPECCHI enseña genética en la Universidad de Utah. Suyas son las técnicas descritas aquí. Además, ha contribuido al estudio de la síntesis de proteínas y ha participado en el descubrimiento de los intensificadores de ADN.

Las unidades funcionales del manual son los genes. Escogemos uno y cambiamos su secuencia específica de nucleótidos: alteraremos su función. Para mayor claridad: si sospecháramos la participación de cierto gen en el desarrollo cerebral, podríamos preparar embriones de ratón en los que el gen normal estuviera "fuera de combate", anulado del todo. Si por culpa de esa inactivación nacieran ratones con malformaciones cerebelares, sabríamos que el gen en cuestión era decisivo para la formación del cerebelo. El proceso mediante el cual se introducen cambios específicos en la secuencia de nucleótidos de un gen se denomina sustitución dirigida de genes ("gene targeting").

La información que se obtenga con los experimentos de sustitución génica en los ratones debiera sernos útil a los humanos, pues el 99 por ciento, y algún pico más, de los genes coinciden en ambas especies y cumplen similares cometidos. Esa línea de investigación en el ratón arroja luz, no sólo sobre las etapas del desarrollo embrionario humano, sino también sobre la constitución de nuestro sistema inmunitario y su intervención en la lucha contra las infecciones. Es de presumir que esa técnica de sustitución nos conduzca más lejos, hasta el funcionamiento del cerebro humano y la forma en que ciertos defectos génicos se traducen en enfermedad. A propósito de esto último, se está aplicando la técnica para provocar en ratones modelos de enfermedades humanas: fibrosis quística, cáncer y aterosclerosis, por citar algunas.

El entusiasmo despertado por la técnica de sustitución se alimenta con otra esperanza, la de su promesa de ahondar en el conocimiento generado por el proyecto genoma. Aspira esta magna empresa a establecer la secuencia nucleotídica de todos los genes que componen el genoma humano y el del ratón (unos 200.000 genes en cada caso). Se ha identificado sólo la función de un pequeñísimo porcentaje de genes de cada una de esas especies. La secuencia de nucleótidos de un gen determina los aminoácidos que deben ensartarse para formar una proteína dada. (Las proteínas llevan a cabo la mayoría de las actividades celulares.) La propia secuencia de aminoácidos de una proteína suministra, a su vez, importantes pistas sobre el papel que ésta desempeña en las células: actividad enzimática, componente estructural o molécula transmisora de señales. Pero la secuencia no basta, por sí misma, para revelar las tareas realizadas por la proteína durante la vida del animal. La sustitución génica dirigida sí puede proporcionar esa información y ampliar



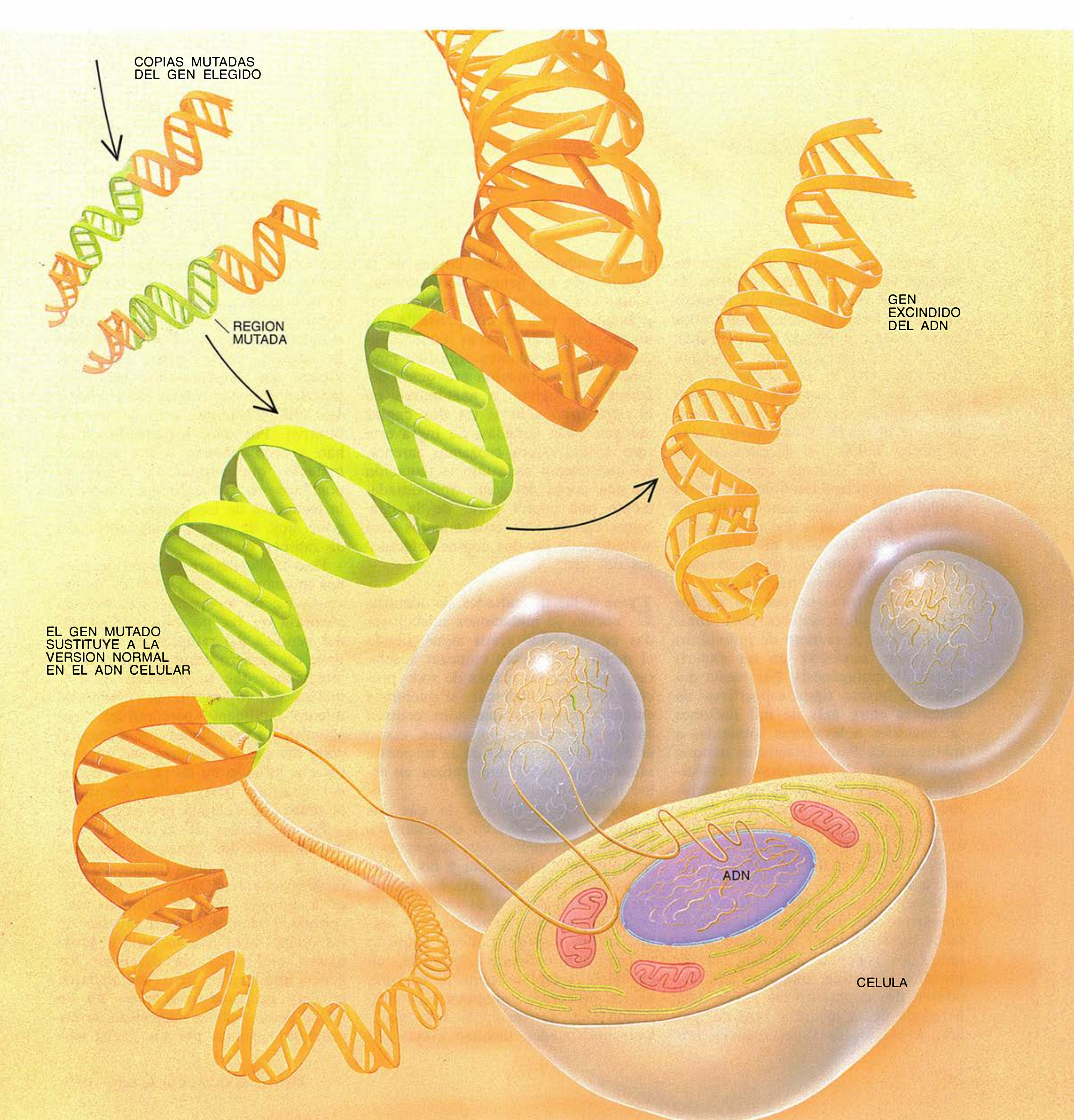
1. MUTACION DIRIGIDA de un gen celular. El procedimiento consiste en introducir copias mutadas del gen (*moléculas verdes y amarillas de la izquierda*) en las células y dejando que una copia ocupe el lugar del gen original (*molécula amarilla de la derecha*) en el cromosoma correspondiente. Estas células alteradas permiten producir ratones con mutaciones genéticas específicas. La aparición de una cola curvada y problemas de equilibrio y audición en uno de los ratones (*arriba*) llevó al descubrimiento de que el gen afectado, el *int-2*, participa en el desarrollo de la cola y el oído interno.

nuestro conocimiento sobre las funciones de los genes y sus proteínas.

La sustitución génica nos ofrece una nueva manera de hacer genética de mamíferos: la posibilidad de ver cómo intervienen los genes en los procesos biológicos. Los métodos clásicos de la disciplina, muy fructíferos a la hora de abordar esos procesos en organismos elementales, no acababan de adaptarse al estudio de seres de la complejidad de los mamíferos.

Para saber cómo replican su ADN bacterias y levaduras, unicelulares, basta con exponer mil millones o más a un agente químico lesivo para el ADN (un mutágeno). Eligiendo la dosis adecuada del mutágeno, aseguraremos que cada individuo porte una mutación en uno o varios genes. A partir de esta población de bacterias o levaduras que han experimentado mutagénesis, identificaremos individuos incapaces de replicar su ADN. En tamaña población resulta probable hallar individuos distintos con mutaciones en cada uno de los genes necesarios para la replicación del ADN. (En la replicación del genoma bacteriano o de levaduras participan un centenar largo de genes.) Una vez identificados los genes, podemos determinar su papel específico en la replicación: qué genes controlan la decisión de copiar el ADN y cuáles la precisión y tasa de duplicación.

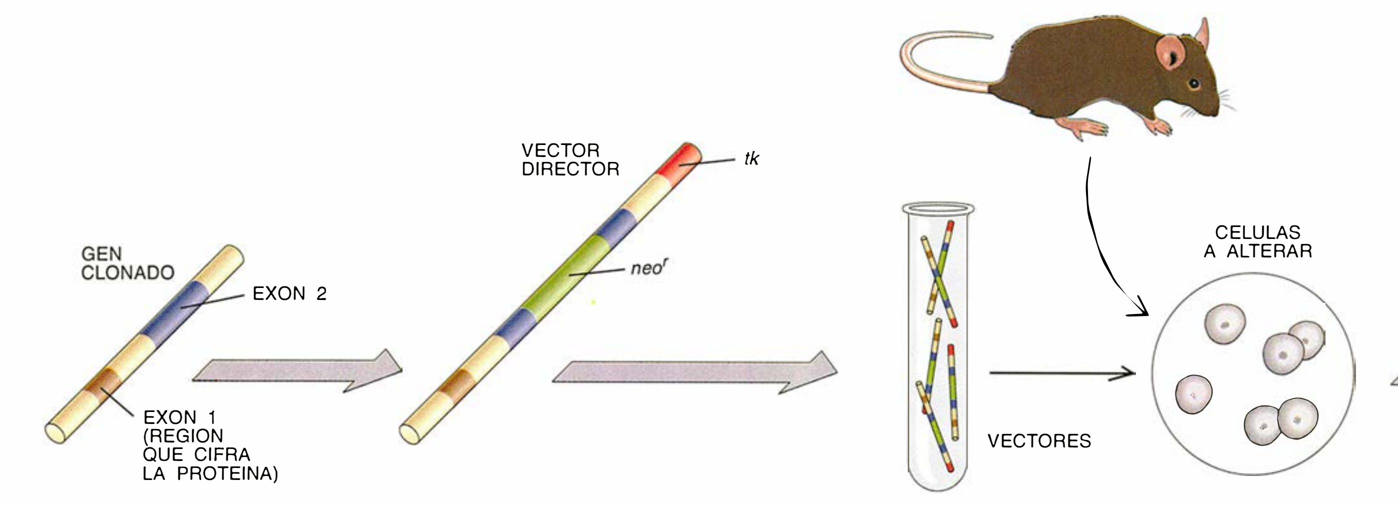
Planteamientos similares se han aplicado a los organismos pluricelulares. Los dos favoritos de los genéticos son *Caenorhabditis elegans*, un gusano, y *Drosophila melanogaster*,



Sustitución dirigida de genes en cultivos celulares

1. Se alteran las copias de un gen (*barra de la izquierda*) en el tubo de ensayo y se prepara un vector director (*barra alargada*). El gen mostrado se ha inactivado por inserción del gen *neo*ʳ (*verde*) en la región que cifra la proteína (*azul*). El gen *neo*ʳ servirá de marcador para indicar que el ADN vector se ha instalado en un cromosoma. En un extremo del vector se ha introducido un segundo marcador: el gen *tk* de herpes (*rojo*).

2. Vector y sus dos marcadores se introducen en células (*gris*) aisladas de un embrión de ratón.



la mosca del vinagre. No obstante, incluso en estas formas sencillas de organismos pluricelulares, la identificación de todos los genes implicados en un proceso biológico es dificilísima.

Varios factores explican semejante dificultad. Uno es el tamaño del genoma. El de la bacteria *Escherichia coli* contiene sólo 3000 genes, mientras que el de *D. melanogaster* tiene al menos 20.000 y el de ratón, 10 veces esa cifra. Cuanto mayor es el número de genes tanto mayor es la complejidad, porque aquéllos forman redes interactivas más intrincadas. Averiguar el efecto de cualquiera de esos genes en una red tan enrevesada constituye una tarea hercúlea.

Además, el mayor tamaño de los organismos pluricelulares pone límites prácticos al número de individuos que puede abarcarse en un experimento de mutagénesis. No cuesta demasiado buscar tipos específicos de mutantes entre más de mil millones de bacterias o levaduras sometidas a mutagénesis. Pero detectarlos aunque sólo sea en 100.000 moscas constituiría un experimento de una magnitud inabordable. A modo de comparación, en los ratones se alcanzaría el límite práctico de detección de una mutación dada en torno a los mil animales.

Al ser en su mayoría diploides los organismos pluricelulares, las dificultades logísticas para identificar y estudiar los genes se redoblan; ser diploides significa que sus células poseen dos copias de los genes, una heredada de la madre y otra del padre. A efectos de supervivencia, importa mucho tener dos copias de la mayoría de los genes. Normalmente, si una copia sufre una mutación perjudicial, la otra la compensa, y así no se producen graves consecuencias. Esta redundancia significa también que una mutación provocará defectos fisiológicos o anatómicos en el organismo sólo si las dos copias del gen están dañadas. Se logra este tipo de individuos cruzando parentales que tengan cada uno la mutación en una copia del gen. Aproximadamente una cuarta parte de la descendencia de esos cruzamientos será portadora de las dos copias defectuosas del gen.

Pese a las dificultades, la identificación de mutaciones seleccionadas en animales vivos sigue siendo el mejor medio para empezar a aclarar y ordenar las etapas de todo proceso biológico. Además, si queremos entender procesos que sólo ocurren en los organismos complejos, como el desencadenamiento de la respuesta inmunitaria, habrá que realizar en éstos los análisis.

Esa es la razón por la que los genéticos interesados en el desarrollo, las funciones neuronales, la respuesta inmunitaria, la fisiología y las enfermedades de los mamíferos hayan empezado a trabajar con el ratón. Desde un punto de vista genético, este animal es un mamífero ideal. Pequeño y prolífico, constituye, además, un excelente referente para la mayoría de los procesos biológicos humanos.

Con todo, las manipulaciones genéticas que pueden llevarse a cabo en los ratones son, comparadas con las operaciones permitidas en los organismos simples, muy limitadas. Para identificar ratones que han experimentado mutagénesis y son portadores de defectos en los genes que intervienen en determinados procesos, tendrían que controlarse de 10.000 a 100.000 individuos, a un costo prohibitivo. Por ello, los estudiosos se han venido ciñendo a los animales mutantes que surgían de modo espontáneo en sus colonias. Fruto de la tenacidad de los genéticos, se dispone hoy de una nutrida colección de ratones mutantes.

Pero ni siquiera ese grupo de ratones mutantes se halla libre de inconvenientes: no representan una muestra aleatoria de las posibles mutaciones del genoma del ratón, sino que contiene un número desproporcionado de mutaciones que se traducen en anomalías fisiológicas o de comportamiento fácilmente perceptibles. Así, abundan las mutaciones que afectan al color del pelaje, mientras que hay pocas que influyan en las primeras etapas del desarrollo (pues suelen determinar la muerte inesperada del embrión).

Por no hablar de lo costoso que resulta aislar los genes responsables de los defectos manifiestos en los ratones mutantes; tarea ésta que exige a menudo años de esfuerzo concertado. Podemos deducir muchas de las etapas involucradas en los fenómenos biológicos sin descubrir los genes implicados; pero sin aislarlos no hay progreso molecular: no se puede determinar la naturaleza de las proteínas cifradas por los genes mu-

3. Se produce recombinación homóloga (*arriba*): el vector se alinea con el gen normal (el objetivo), ubicado en un cromosoma; a continuación, las regiones idénticas alineadas del vector (junto con cualquier ADN que haya intercalado entre ellas) ocupan el lugar del gen original y se produce la exclusión del marcador situado en el extremo (*rojo*). En muchas células, sin embargo, se produce inserción aleatoria de todo el vector (también el marcador extra) en algún cromosoma (*centro*) y en otras la integración fracasa (*abajo*).

4. Para aislar las células portadoras de una mutación dirigida, se cultivan todas en un medio que contenga ciertas drogas: un análogo de la neomicina (G418) y el ganciclovir. El G418 es letal para las células, a menos que lleven un gen *neo*^{r} funcional; elimina, pues, las células en las que no se haya integrado el vector ADN (*gris*). El ganciclovir mata las células que tienen un gen *tk*; es decir, elimina las células portadoras de un vector integrado al azar. Las únicas células que sobreviven y proliferan son las que portan la inserción dirigida (*verde*).

tados, ni identificar las células en las que dichos genes son activos.

La sustitución génica dirigida permite superar tales dificultades al dejar en nuestras manos qué gen queremos alterar. También permite ejercer el control sobre el tipo de modificaciones introducidas en el gen, de suerte tal que la mutación puede diseñarse a medida para abordar cuestiones específicas sobre la función del gen. Los criterios para seleccionar el gen a mutar pueden basarse en el conocimiento obtenido de la investigación en ratones y otras especies. Ahora resulta bastante fácil aislar una serie de genes que son activos durante la formación del corazón del ratón; la sustitución de genes permitiría, por tanto, determinar el papel de cada uno de esos genes en el desarrollo cardíaco. Por vía alternativa, podemos averiguar si existe en el ratón una serie de genes cuya función en *D. melanogaster* consiste en guiar el desarrollo neuronal y si cumplen una función similar.

De entrada se pretende anular el gen a estudiar, para conocer las consecuencias que arrastra la ausencia del producto que dicho gen determina. Probablemente serán complejas y afectarán a múltiples vías metabólicas. Puede comprenderse aún mejor la función del gen introduciendo mutaciones definidas, más sutiles, que incidan sólo en una de sus múltiples funciones. Muy pronto, podrán ponerse los genes bajo el control de un conmutador, elemento que permitirá conectar y desconectar un gen durante el desarrollo embrionario o posnatal del ratón. Supongamos, por ejemplo, un gen, hipotético, responsable de la formación y el funcionamiento de una serie de neuronas. La anulación del gen determinaría la ausencia de esas neuronas durante la formación del cerebro e impediría valorar la actividad génica en el adulto. Si el gen estuviera bajo el control de un conmutador, éste podría dejarse conectado durante el desarrollo, y las neuronas se formarían normalmente. En el adulto, el conmutador se desconectaría; podríamos evaluar entonces la función del gen sobre las neuronas.

En los últimos 15 años la técnica de la sustitución génica dirigida ha avanzado mucho. Cuando yo empecé, a finales de los años setenta, utilizaba agujas de cristal muy pequeñas para inyectar ADN directamente en el núcleo de las células de mamífero. Las agujas se controlaban mediante micromanipuladores hidráulicos y las dirigíamos hacia el núcleo con la ayuda de microscopios de alta resolución. El procedimiento resultó de una gran eficacia. Una de cada tres o cinco células recibía ADN funcional y comenzaba a dividirse y a transmitirse establemente a las células hijas.

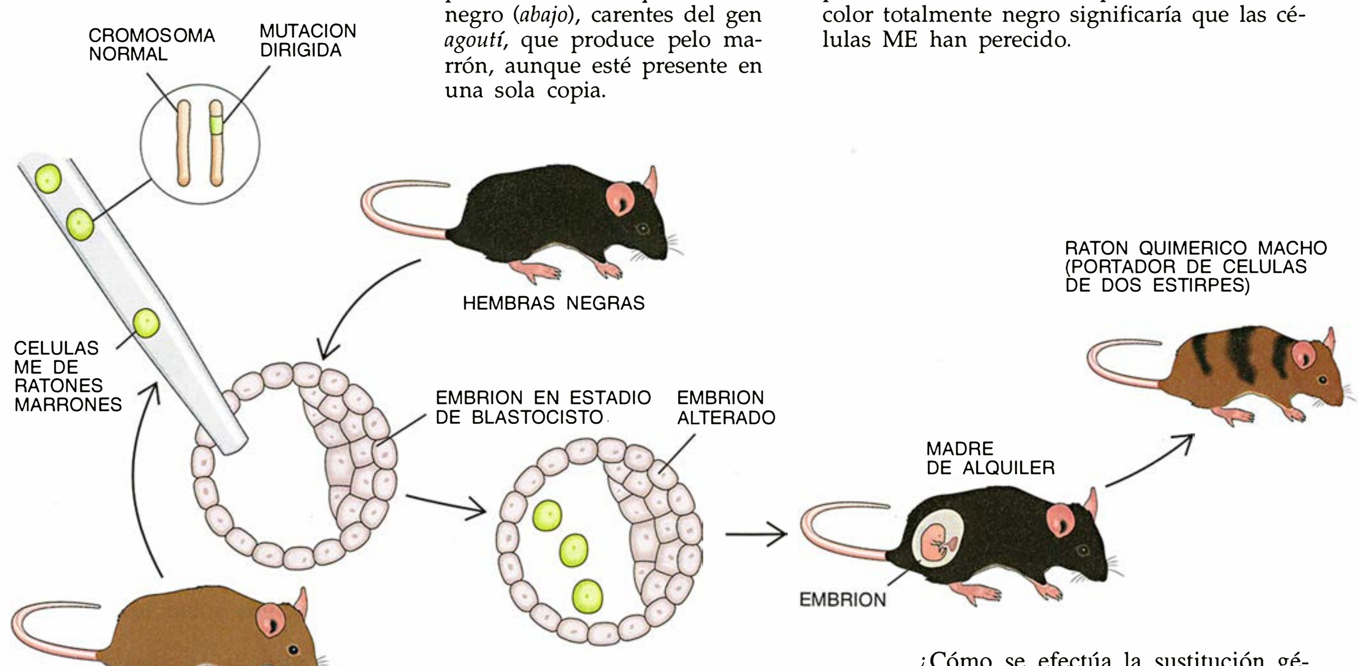
Cuando investigué el sino de esas moléculas de ADN en el interior celular, un sorprendente fenómeno llamó mi atención. Aunque las moléculas de ADN recién introducidas se insertaban al azar en uno de los cromosomas de la célula receptora, a veces se introducía más de una molécula en el mismo sitio y todas tenían la misma orientación. Igual que en los idiomas existe una dirección de lectura (de izquierda a derecha en español), así también en las moléculas de ADN. Según parecía, antes de que las células llevaran a cabo la inserción aleatoria, había algún mecanismo nuclear en virtud del cual las moléculas de ADN introducidas se engarzaban en la misma orientación.

Demostramos que las células utili-

Sustitución génica dirigida en ratones

1. Se aíslan células madre embrionarias (ME) (*verde, a la izquierda*) de una estirpe de ratón de color marrón y se introduce una mutación dirigida en un cromosoma (*inserto*). Las células ME se colocan a continuación en embriones jóvenes. El color del pelaje de las futuras crías sirve de guía para comprobar si las células ME han sobrevivido en el embrión. En general se introducen las células ME en embriones que, sin ellas, originarían ratones totalmente negros. Estos embriones se obtienen a partir de una estirpe de color negro (*abajo*), carentes del gen *agoutí*, que produce pelo marrón, aunque esté presente en una sola copia.

2. Los embriones que contienen las ME se dejan crecer a término en "madres de alquiler". Se examina el pelo de los recién nacidos. La presencia de parches marrones sobre una fondo negro manifiesta que las células ME han sobrevivido y proliferado en el animal. (Se llaman quimeras porque contienen células procedentes de dos estirpes de ratón.) Un color totalmente negro significaría que las células ME han perecido.



zaban un proceso de recombinación homóloga para conseguir tales engarces. La recombinación homóloga se produce sólo entre moléculas de ADN que tienen la misma secuencia de nucleótidos: se alinean una al lado de la otra, ambas sufren cortes y se juntan por lo extremos cortados. Los empalmes se realizan con tal precisión, que no se altera la secuencia nucleotídica del sitio donde se producen dichos engarces.

Esta inesperada observación revelaba que todas las células de ratón, y presumiblemente todas las de mamífero, poseían la maquinaria necesaria para llevar a cabo la recombinación homóloga. En aquellas fechas no había razones para sospechar que contaran con ella las células somáticas, que no están implicadas en la reproducción sexual. Comprobamos la eficacia sobresaliente del mecanismo, pues logramos microinyectar más de 100 moléculas de ADN de idéntica secuencia, que las células engarzaron en la misma orientación. Inmediatamente comprendí que, si aprovechábamos esta maquinaria para provocar la recombinación homóloga entre una molécula recién introducida de ADN de nuestra elección y la misma secuencia del cromosoma de una célula, podríamos reescribir a voluntad su manual de instrucciones.

Entusiasmado ante esta perspectiva, en 1980 solicité una subvención para investigar la viabilidad de la técnica de sustitución génica dirigida. Pero el comité de expertos que revisó el proyecto lo rechazó. En su opinión, la probabilidad siquiera de que la secuencia de ADN recién introducida encontrase su secuencia homóloga en los 1000 volúmenes del manual de instrucciones genéticas parecía mínima.

Pese a la denegación, decidí aprovechar los fondos que recibía de otro proyecto. Era una empresa arriesgada. Si fracasaba, no dispondría de datos suficientes para solicitar la renovación de la subvención. La fortuna vino en mi ayuda. En 1984, cuando volvimos a solicitar fondos para proseguir la investigación, teníamos pruebas de la viabilidad de la sustitución génica en las células. Los expertos que habían rechazado la primera propuesta demostraron ahora su buen sentido del humor. El informe de valoración del nuevo proyecto empezaba con la siguiente frase: "Nos alegramos de que no siguiese nuestros consejos."

¿Cómo se efectúa la sustitución génica dirigida en las células? Se empieza por clonar el gen que nos interesa y propagarlo en bacterias, para así lograr una fuente pura de ADN que contiene el gen. A continuación, en un tubo de ensayo, se cambia la secuencia de nucleótidos del gen en función de los fines del experimento. Al gen alterado se le denomina vector director ("targeting vector").

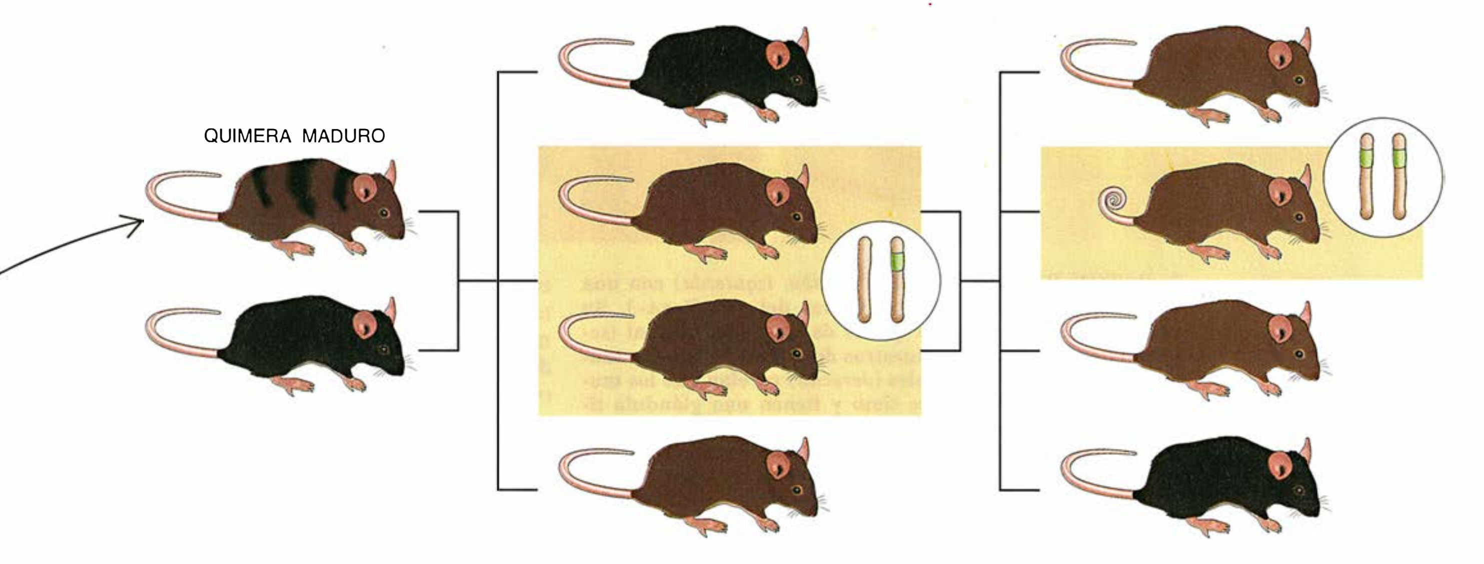
. Se introduce el vector en células vivas. Dentro del núcleo celular, forma complejo con las proteínas que constituyen la maquinaria celular de recombinación homóloga. Ayudado por esas proteínas, el vector busca su secuencia homóloga (el objetivo) por todo el genoma. Si la encuentra, se alinea junto a ella y la sustituye.

Por desgracia, esta sustitución dirigida ocurre sólo en una pequeña fracción de las células tratadas. Lo habitual es que el vector se inserte al azar en lugares no homólogos o que ni siquiera se integre. Debemos, pues, ser capaces de identificar las células en las que la sustitución ha resultado satisfactoria. Aproximadamente una de cada millón de células tratadas tiene la sustitución deseada.

Para simplificar la búsqueda de esas células, utilizamos dos "marcadores seleccionables", que se introducen en el vector director desde el

3. Se cruzan ratones quiméricos macho con hembras negras (no *agouti*). Se analiza la descendencia en busca de indicadores de la mutación dirigida (*inserto verde*) en el gen deseado. Los ratones negros se apartan; si los animales han nacido a partir de esperma procedente de células ME —y con probabilidad de portar la mutación— serían marrones. El examen directo de los genes de los ratones marrones revela cuál de esos animales (*recuadro*) ha heredado la mutación dirigida.

4. Se cruzan machos y hembras portadores de la mutación para obtener ratones cuyas células presenten la mutación en las dos copias del gen (*inserto*), careciendo por tanto del gen funcional. La identificación final de esos animales (*recuadro*) se realiza por análisis directo de su ADN. Por último, se comprueba si tienen algún defecto físico o de comportamiento.



principio. La inclusión de un marcador seleccionable "positivo" promueve la supervivencia y el crecimiento de las células que han incorporado el vector, ya sea donde se pretendía o en una localización aleatoria dentro del genoma. La inclusión del marcador seleccionable "negativo" ayuda a eliminar la mayoría de las células que han incorporado el vector en una localización aleatoria.

El marcador positivo, normalmente un gen de *resistencia a neomicina* (*neo*^{r}), se coloca de tal forma que quede flanqueado por secuencias de ADN también presentes en el gen diana homólogo que se desea reemplazar. El marcador negativo, por lo general el gen de la *quinasa de timidina* (*tk*) de un virus herpes, se fija a un extremo del vector. Cuando se produce recombinación homóloga, los segmentos inalterados del gen clonado, junto con el gen *neo*^{r} intercalado entre ellos, sustituyen a la secuencia diana presente en el cromosoma. Pero el gen *tk*, situado fuera de la zona de secuencias alineadas, no se integra en el cromosoma y es degradado por la célula. Por el contrario, cuando las células insertan aleatoriamente el vector director, lo engarzan todo, incluido el gen *tk*, en el ADN. Si no hay integración, se pierden el vector y sus marcadores.

No necesitamos examinar directamente el ADN para identificar cuál de esas posibilidades ha ocurrido. Nos basta con cultivar las células en un medio que contenga dos drogas: un análogo de la neomicina llamado G418 y el antiherpético ganciclovir. El G418 mata a las células que carecen del gen *neo*^{r} protector en sus cromosomas, esto es, las que no han integrado el ADN vector. Pero permite sobrevivir y crecer a las células portadoras de las inserciones, ya sean aleatorias o dirigidas. A su vez el ganciclovir mata todas las células que tienen el gen *tk* herpético, es decir, las que albergan una inserción aleatoria. Al final, las únicas células supervivientes vienen a ser las portadoras de la inserción dirigida (las que poseen el gen "seleccionable positivo" *neo*^{r} y carecen del gen "seleccionable negativo" *tk*).

En 1984 habíamos demostrado ya que era posible sustituir genes específicos en células de ratón cultivadas. Estábamos preparados para ampliar la técnica al genoma de ratones vivos. Nos servimos de células especiales desarrolladas en 1981 por Matthews H. Kaufman y Martin J. Evans. Se trata de las células madre embrionarias (ME), es decir, células pluripotentes obtenidas de las primeras fases de un embrión de ratón, que pueden cultivarse indefinidamente en placas de Petri y están capacitadas para originar cualquier línea de células.

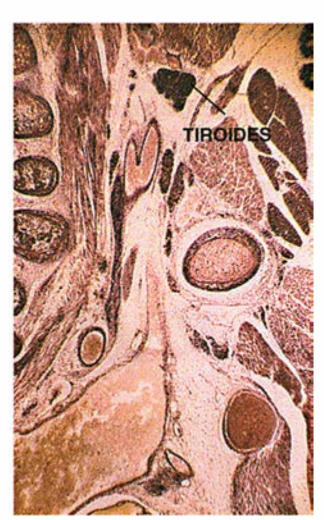
En resumen, mediante el procedimiento antes descrito, produjimos células ME con una mutación dirigida en una de las dos copias del gen elegido. Luego introdujimos las células ME en embriones muy jóvenes de ratón y los dejamos desarrollarse a término. Algunos de los ratones resultantes, cuando maduraron, produjeron esperma derivado de las células ME. Cruzando estos ratones con otros normales, conseguimos descendientes heterocigotos para la mutación, esto es, ratones que la portan en todas las células en una de las dos copias del gen.

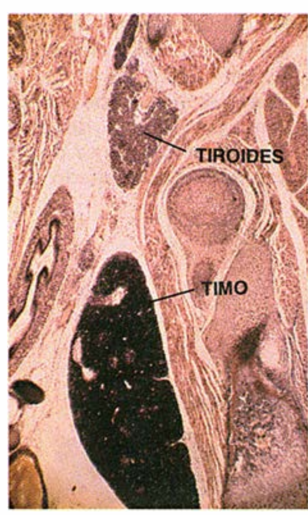
En casi todos los casos, esos heterocigotos estarán sanos, porque la segunda copia del gen, intacta, seguirá funcionando correctamente. Pero el cruzamiento de estos heterocigotos con hermanos o hermanas portadores de la misma mutación produce homocigotos: animales con la mutación dirigida en las dos copias del gen. Estos animales exhibirán anomalías que revelarán las funciones normales del gen sustituido en todos sus tejidos.

Empezamos inyectando nuestras células ME modificadas en embriones en estado de blastocisto, que aún no se han implantado en el útero materno. Como dependíamos del color del pelaje para saber si el procedimiento marchaba de acuerdo con el plan, elegimos blastocistos que en un desarrollo normal se transformarían en crías de color diferente del encontrado en las producidas por la estirpe de ratón de la que obtuvimos las células ME.











2. RATON RECIEN NACIDO (*arriba, izquierda*) **con una mutación dirigida en las dos copias del gen *HoxA-3*. Su cuerpo está más curvado que el de un ratón normal (*segundo por la izquierda*). Muestras de tejidos de ratones mutantes (*izquierda*) y normales (*derecha*) revelan que los mutantes también carecen de timo y tienen una glándula tiroidea exageradamente empequeñecida. Estos y otros defectos indican que el gen *HoxA-3* es necesario para el desarrollo de los tejidos y los órganos que se originan a partir de una estrecha banda de células presentes en los embriones jóvenes (*banda coloreada en el dibujo*).**

Las células madre se aislaron de un ratón marrón que portaba dos copias del gen *agoutí*. Este gen, aun cuando esté presente en una sola copia, produce colorido marrón debido a la presencia, en cada uno de los pelos, de una banda de pigmento amarillo sobre la pigmentación negra normal (la producción de los pigmentos propiamente dichos está controlada por otros genes). Por tanto, seleccionamos blastocistos que, de no ser tratados, se convertirían en ratones negros (los ratones son de color negro cuando el gen agoutí heredado de ambos padres es defectuoso). Esperamos, por fin, a que el embrión, que contenía las células ME modificadas, llegara a término en una "madre de alquiler".

Si todo va bien, las células ME alteradas se reproducen repetidamente durante este tiempo, transmitiendo copias completas de todos sus genes a sus células hijas; éstas se mezclan con las del embrión y contribuyen a la formación de la mayoría de los tejidos del ratón. Por consiguiente, los recién nacidos son quimeras: ratones compuestos por células derivadas de las ME extrañas y de las células del embrión original. Las quimeras son fáciles de identificar por los amplios parches de color marrón que presentan en un pelaje negro. Si los animales no portaran células derivadas de las ME, serían completamente negros porque carecerían de genes *agoutí* funcionales.

Ahora bien, con sólo mirar las quimeras no podemos determinar si las células ME dieron origen a células germinales, instrumento por el que se transmite la mutación a las generaciones futuras. Y esto lo averiguamos sólo al pasar a la etapa siguiente: la de producción de ratones heterocigotos portadores de una copia de la mutación en todas sus células. Para generar esos animales, cruzamos ratones quiméricos machos con hembras negras, defectivas para el gen *agoutí*. Los descendientes serán marrones si el esperma que fecundó el óvulo procede de las células ME (ya que todo ese esperma lleva el gen *agoutí*). Si el esperma deriva de las células del blastocisto original (sin genes *agoutí* funcionales), los descendientes serán negros.

Así pues, cuando vemos crías marrones, sabemos que los genes transportados por las células ME han ido a parar a esos descendientes, y ya podemos iniciar los cruzamientos entre hermanos heterocigotos para producir ratones con dos copias defectuosas del gen objetivo. Antes, sin embargo, debemos saber qué crías marrones son las portadoras de una copia del gen mutado. Esto lo conseguimos buscando la mutación por examen directo de su ADN. Cuando se cruzan hermanos heterocigotos, uno de cada cuatro descendientes tendrá las dos copias defectuosas del gen. Identificamos los homocigotos también por análisis directo de su ADN, esta vez buscando dos copias de la mutación. Luego, se examinan los animales para comprobar la existencia de anomalías anatómicas, fisiológicas o de comportamiento que puedan dar pistas sobre la función del gen alterado. Todo el procedimiento, desde la clonación de un gen hasta la producción de ratones con una mutación dirigida en ese gen, viene a durar alrededor de un año.

Laboratorios de todo el mundo aplican ahora la técnica de la sustitución génica dirigida en ratones para estudiar una amplia variedad de problemas biológicos. Desde 1989 se han producido más de 250 estirpes portadoras de defectos genéticos seleccionados. Unos pocos ejemplos de los descubrimientos obtenidos permitirán ilustrar el tipo de información que estos animales pueden suministrar.

En mi propio laboratorio hemos estado explorando las funciones de los genes homeóticos, o genes *Hox*. Estos genes son una suerte de conmutadores maestros encargados de que las diferentes partes del organismo, como las extremidades, los órganos y las partes de la cabeza, se formen en los lugares adecuados y adopten su morfología correcta. Los estudios sobre los genes homeóticos de *Drosophila* han suministrado valiosa información sobre sus actividades. Sin embargo, quedan por resolver muchas cuestiones. Por ejemplo, *D. melanogaster* tiene sólo ocho genes *Hox*, mientras que el ratón y el hombre tienen 38 cada uno. Probablemente, la expansión de la familia *Hox* desempeñó un papel crucial en la progresión evolutiva de invertebrados a vertebrados, aportando la maquinaria adicional necesaria para formar un cuerpo más complejo. ¿Qué función precisa cumplen esos 38 genes?

Antes de que dispusiésemos de la técnica de sustitución génica dirigi-

da, no había forma de responder a esa pregunta, ya que nadie había encontrado ratones o seres humanos con mutaciones en ninguno de los 38 genes *Hox*. Mis colegas y yo mismo estamos embarcados ahora en un proyecto cuyo objetivo es establecer la función de cada uno de esos genes. Más tarde intentaremos identificar cómo establecen una red interactiva para dirigir la formación de nuestro cuerpo.

Dentro de ese programa, hemos descubierto que la alteración dirigida del gen *HoxA-3* origina múltiples defectos. Los ratones que portan dos copias mutadas del gen mueren al nacer por disfunción cardiovascular debida al desarrollo incompleto del corazón y los principales vasos sanguíneos que arrancan del mismo. Esos ratones nacen también con aberraciones en otros muchos tejidos, entre ellos el timo y el paratiroides (que faltan), la glándula tiroidea, el hueso y los cartílagos de la parte inferior de la cabeza, el tejido conectivo, el músculo y el cartílago de la faringe.

Esas anomalías, aunque dispares, comparten un rasgo común: todos los tejidos afectados descienden de células que estaban agrupadas en un principio en una estrecha región de la parte superior del embrión en desarrollo. Los rudimentos del corazón, por ejemplo, se alojan en esa región antes de alcanzar su ubicación más retrasada en el tórax. Parece, por tanto, que la función del gen *HoxA-3* consiste en controlar la construcción de muchos de los tejidos y órganos que se originan en esa estrecha región.

Inesperadamente comprobamos que el desorden producido por la desactivación del gen *HoxA-3* del ratón semejaba el observado en el síndrome de Di George, una enfermedad hereditaria humana. El análisis cromosómico de los pacientes con ese síndrome muestra que el gen *HoxA-3* humano no es el culpable; las víctimas presentan daños genéticos en un cromosoma distinto del que alberga dicho gen. Ahora sabemos, sin embargo, que el gen responsable del síndrome actúa dificultando la activación del *HoxA-3* o los episodios desencadenados por ese gen. Además, contamos ya con un modelo de la enfermedad en el ratón que acabará proporcionando pistas para su tratamiento. Este imprevisto beneficio resalta el valor de la investigación básica: los descubrimientos nacidos de la curiosidad suelen llevar a aplicaciones muy prácticas.

Los inmunólogos se han beneficiado también de la técnica de sustitución génica. La están aplicando para acotar la responsabilidad de cada uno de los más de 50 genes que influyen en el desarrollo y el funcionamiento de las dos clases principales de células defensoras del organismo: linfocitos *B* y linfocitos *T*. Los oncólogos acuden también a ella. Con frecuencia se confirma que uno o más tipos de tumores comparten mutaciones en un gen concreto, cuyo papel normal, sin embargo, se desconoce. Su descubrimiento mediante el empleo de nuestra técnica de anulación puede ayudar a revelar cómo contribuye la forma mutante del gen al desarrollo de la neoplasia.

El gen supresor tumoral *p53* ofrece un ejemplo que hace al caso. Se entiende por genes supresores de tumores aquellos cuya inactivación contribuye al desarrollo del cáncer. Es posible que hasta en el 80 por ciento de todos los cánceres humanos el gen *p53* esté mutado, pero hasta hace muy poco se desconocía su función normal. El análisis de ratones homocigotos para una mutación dirigida en *p53* indicó que probablemente este gen actúe a modo de cancerbero que impida la división de las células sanas hasta no haber reparado cualquier daño que haya podido sufrir su ADN. Daños infligidos a menudo a las células como consecuencia de las frecuentes agresiones ambientales a las que están sometidas. La pérdida de los genes *p53* funcionales elimina esa salvaguarda, lo que facilita la transmisión del gen lesionado a las células hijas, donde participa en el desarrollo cancerígeno.

No sólo el cáncer. Más de 5000 enfermedades humanas se han atribuido a defectos genéticos. La identificación de los genes y las mutaciones responsables de esas enfermedades permitirá conseguir las mismas mutaciones en ratones. Los modelos en ratones harán posible, a su vez, la identificación detallada de los procesos que median entre el funcionamiento anómalo de un gen y la manifestación de la enfermedad. Con un mejor conocimiento de la patología molecular de la enfermedad diseñaremos terapias más eficaces. Entre los modelos que se están creando ahora destacan los ratones con diferentes tipos de mutaciones en el gen de la fibrosis quística.

Esta técnica genética se está empezando a emplear también en el estudio de la aterosclerosis, responsable último de accidentes cerebrovasculares y cardiopatías. A diferencia de la fibrosis quística, la aterosclerosis no está causada por mutaciones en un solo gen. Defectos en varios genes se combinan con los factores ambientales para promover la acumulación de placas en las arterias. Pero se han conseguido prometedores modelos en ratones alterando genes cuya participación en el procesamiento de los triglicéridos y el colesterol se conoce. Preveo también que pronto se desarrollarán modelos para la hipertensión, otra de las culpables de las enfermedades cardíacas y las apoplejías, ahora que se están identificando los genes a los que se atribuye participación en su desarrollo.

Cuanto más ahondamos en la genética de las enfermedades, mayor es nuestro deseo de aplicar la terapia génica para corregir los defectos. De momento, las técnicas utilizadas en dicha terapia se basan en la inserción aleatoria de genes sanos en los cromosomas para compensar las versiones dañadas. Mas los genes así insertados no suelen funcionar con la eficacia de los que ocupan su lugar correcto en el cromosoma. En principio, la sustitución génica dirigida puede ofrecer una solución a ese problema. Sin embargo, antes de que la técnica pueda utilizarse para corregir un gen defectuoso en el tejido de un paciente, habrán de obtenerse cultivos de células capaces de participar en la formación de esos tejidos en el adulto. Dichas células, que, como las ME de nuestros estudios, se denominan células madre, están presentes en médula ósea, hígado, pulmones, piel, intestinos y otros tejidos. Pero la investigación sobre cómo aislar y cultivar esas células está todavía en mantillas.

Antes de vencer los obstáculos técnicos que impiden la aplicación general de nuestros métodos a la terapia génica, la sustitución génica encontrará un uso común en el estudio de la neurobiología de los mamíferos. Ya se han preparado ratones con mutaciones dirigidas que alteran su capacidad de aprendizaje. La identificación de nuevos genes neuronales acelerará el desarrollo de esta línea de trabajo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE NEW MOUSE GENETICS: ALTERING THE GENOME BY GENE TARGETING. M. R. Capecchi en *Trends in Genetics,* vol. 5, número 3, páginas 70-76; marzo de 1989.

ALTERING THE GENOME BY HOMOLOGOUS RECOMBINATION. M. R. Capecchi en *Science*, vol. 244, págs. 1288-1292; 16 de junio de 1989.

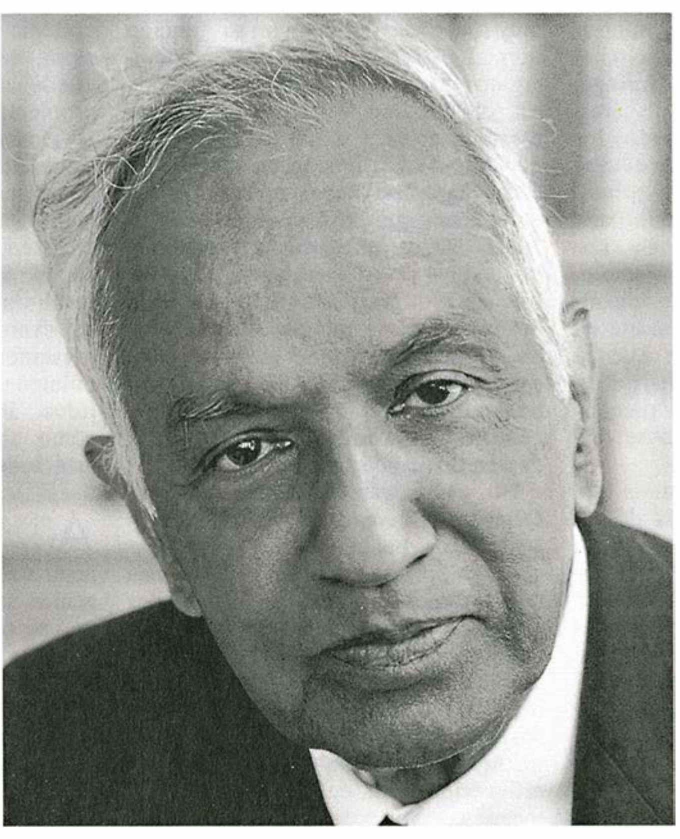
REGIONALLY RESTRICTED DEVELOPMENTAL DEFECTS RESULTING FROM TARGETING DISRUPTION OF THE MOUSE HOMEOBOX GENE *HOX*-1,5. Chisaka y M. R. Capecchi en *Nature*, volumen 350, n.º 6318, páginas 473-479; 11 de abril de 1991.

John Horgan

SUBRAHMANYAN CHANDRASEKHAR: *En la recta final*

Subrahmanyan Chandrasekhar, en traje oscuro de líneas clásicas, estrecha mi mano con decisión. "¿Sobre qué quiere que hablemos?", comienza. Le confieso mi interés por su vida profesional, incluida su demostración, en los años treinta, de que las estrellas con masa por encima de cierto valor —el hoy llamado límite de Chandrasekhar— sufren un irremediable colapso. Ese hallazgo, que le valió tardíamente, todo hay que decirlo, el premio Nobel, constituye un hito de la astrofísica. También me gustaría conocer algo de su última investigación, la obra de Isaac Newton *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ("Principios Matemáticos de la Filosofía Natural"), trabajo que puso los fundamentos de la ciencia moderna.

Aunque está terminando un libro sobre los *Principia*, no parece decidido a adelantarme nada sobre el mismo. Cuando le explico que su perfil no tendrá más de dos páginas, endurece el gesto de reticencia. "¿Usted cree que podría resumir la *Odisea* de Homero en dos páginas? ¿Cree que puede resumir la Capilla Sixtina en sólo dos páginas?" Le tiembla la voz entre incrédulo y desconcertado. "Si escribe sólo dos páginas, esta conversación carece de interés".



Chandrasekhar califica los Principia *de Newton como un logro "sin igual en la historia de la ciencia."*

La conversación prosigue, no obstante, y Chandrasekhar, torna a ser la persona encantadora de siempre. Bromea, cuenta anécdotas, recuerda aforismos. Pero en ese instante tenso ha puesto de manifiesto su pasión, no sólo por el rigor científico sino también por la belleza, indisolublemente fundidas en su mente. Gracias a ese rasgo de su personalidad, superó un golpe terrible al comienzo de su carrera y se convirtió en uno de los físicos más reputados.

Creció en un ambiente de noble ambición intelectual. Su madre, además de educar a 10 hijos, encontró tiempo para traducir *Casa de muñecas*, de Henrik Ibsen, al tamil. Su padre fue un funcionario a cuyo hermano menor, el físico C. V. Raman, le fue otorgado el premio Nobel en 1930. No es sorprendente, pues, que Chandrasekhar sobresaliera entre los estudiantes de la Universidad de Madrás.

Abandonó la India en 1930 para inscribirse en Cambridge. Desde entonces sólo ha vuelto de visita a su país de origen. Admite haberse preguntado cómo se habría desarrollado su vida profesional si hubiese permanecido en la India. Como su tío Raman, podría haber llegado a presidir su propia institución científica, pero entonces se habría inevitablemente visto envuelto en la política de su país.

Una vez en Cambridge, comenzó por aplicar sus amplios conocimientos de mecánica cuántica y relatividad a la evolución estelar. Entre sus mentores se hallaba Sir Arthur Eddington, cuyo influyente texto sobre astrofísica había atraído a Chandrasekhar a dicho campo. Pronto sus incursiones en él le condujeron a una inquietante conclusión. La mayoría de los astrónomos creía que, cuando una estrella agotaba su combustible nuclear, evolucionaba hasta convertirse en enana blanca permanente. Los cálculos de Chandrasekhar revelaron que, en estrellas de masa superior a 1,4 veces la solar, la gravedad podría dominar sobre la presión repulsiva suministrada por los electrones, provocando un colapso a estados más densos que los de enana blanca.

Los astrónomos llegaron a desentrañar el destino de estrellas con masa mayor que el límite de Chandrasekhar: tras erupcionar constituidas en supernovas, sus núcleos implosionan convirtiéndose en estrellas muy compactas, conocidas como estrellas de neutrones o en agujeros negros. Pero el hallazgo de Chadrasekhar tardó en reconocerse. Ello fue debido a que en 1935, inmediatamente después de que, a sus 24 años, presentase su teoría ante la Real Sociedad de Astronomía, el propio Eddington se levantó para ridiculizarla como intrínsecamente errónea, un ejemplo de reducción al absurdo.

Insiste en que en aquel momento no tuvo resentimiento contra Eddington; incluso continuaron siendo amigos. Sin embargo, el rechazo de

Eddington de la teoría de Chandrasekhar le impulsó en 1937 a dejar Cambridge por la Universidad de Chicago. También dejó con su traslado el colapso estelar, pero no sin haber escrito un libro. "Bien, lo decidí simplemente: escribiré un libro, presentaré mi idea y cambiaré de tema para dedicarme a otras cosas. Y eso, como ve, es lo que ha ocurrido."

Aunque originado por un trauma, este patrón —inmersión total en un tema seguido por un cambio repentino de dirección hacia "otras cosas"— llegó a ser algo característico de este físico que ha cumplido 83 años. Tras su época consagrada a la evolución estelar, invirtió cinco años analizando el movimiento de las estrellas en el interior de las galaxias, demostrando que aquéllas ejercen cierta fricción entre sí debido a su mutua interacción gravitatoria. De 1943 a 1950 se ocupó de la transferencia de radiación en el interior de las estrellas y en las atmósferas de los planetas. A continuación, vinieron períodos dedicados a las propiedades de los fluidos, los campos magnéticos y los elipsoides, objetos geométricos cuyas propiedades se han mostrado muy útiles a la hora de explicar el comportamiento de las galaxias. Entre 1974 y 1983 estudió los agujeros negros.

Los libros que Chandrasekhar escribió al final de cada período se convirtieron en clásicos, alabados por su claridad. Afirma que siempre buscó presentar sus descubrimientos de la forma más elegante posible, también desde el punto de vista literario. "Para aprender elijo algunos escritores", me confía. "Por ejemplo, leo a Henry James o a Virginia Woolf, y no me limito a seguir el texto como una novela; me fijo en cómo construyen las frases, cómo forjan los párrafos, cómo engarzan un párrafo con otro."

Los científicos no suelen escribir bien, ni siquiera correctamente, apostilla: "Elija cualquier volumen del *Astrophysical Journal* o del *Physical Review*, ábralo al azar, ponga el dedo sobre un párrafo. Puede estar seguro de que encontrará un error, bien sea de estilo, de gramática o de otro tipo." Chandrasekhar promovió con ahínco la redacción cuidada durante los 20 años que dirigió el *Astrophysical Journal*, la publicación más prestigiosa en su campo. "Le diré un comentario malicioso que acostumbraba hacer a los autores", señala, sonriendo: "Su artículo es científicamente correcto, pero me gustaría que le pidiese a su colega del departamento de inglés que lo lea."

La última época de Chandrasekhar comenzó a raíz de la invitación recibida para escribir un artículo en el marco del congreso celebrado en 1987 para conmemorar el 300 aniversario de los *Principia*. Hacía años que había comprado una traducción inglesa del original latino. Pero siempre había estado muy ocupado para salir de su propio territorio, amén de considerarse inmaduro desde el punto de vista intelectual para un estudio serio de un trabajo tan difícil. Advierte que, para entender el estilo un tanto críptico amén de elíptico de Newton, "ha de leerse línea a línea".

Pronto decidió que, en vez atacar el problema a través de los comentarios sobre Newton de otros estudiosos, se zambulliría directamente en los *Principia*. Más concretamente, leería cada proposición, y antes de llegar a la prueba ofrecida por Newton, trataría de deducirla él mismo. Chandrasekhar señala que, aunque tenía 300 años de conocimientos a su disposición, en la inmensa mayoría de los casos sus demostraciones fueron inferiores a las de Newton.

"¿No es verdad qué resulta extraño que el hombre posea una consuntiva pasión por realizar algo para lo cual carece de condiciones?"

La lectura de Newton se convirtió para él en una continua fiesta. "La visión que muestra de la ciencia, la claridad con que escribe, la cantidad de cosas nuevas que descubre, ponen de manifiesto una profundidad de comprensión tanto en física como en matemáticas sin paralelo en la historia de la ciencia." Es bien sabido que Newton inventó el cálculo matemático y estableció los fundamentos de la gravitación y la óptica. Pero Chandrasekhar sostiene que los *Principia* encierran otros logros que han pasado inadvertidos. Por ejemplo, Newton proporcionó una teoría del giróscopo, y sin embargo éste no fue inventado hasta 200 años después. Fue el primero en advertir que el conocimiento de las condiciones iniciales de un sistema permite predecir por completo su comportamiento futuro, un descubrimiento atribuido a Laplace. Formuló una teoría de formación de imágenes habitualmente adscrita a Lord Kelvin.

Chandrasekhar está tan prendado del estilo de los *Principia* como de su contenido. Compara la prosa de Newton con la de Henry James, quien también gustaba de frases largas y complejas. Para demostrarlo, abre su ejemplar de los *Principia* y lee: "No hemos de admitir más causas de los fenómenos naturales que aquellas que son a la vez ciertas y suficientes para dar cuenta de ellos. En este sentido dicen los filósofos que la Naturaleza no hace nada en vano, y una causa es tanto más innecesaria cuanto para menos sirve, puesto que la Naturaleza se goza en la simplicidad y le desagrada la pompa de las causas superfluas." Levanta la vista y exclama con voz trémula, "¿No es verdad que la frase es bellísima? ¡Por supuesto!"

Chandrasekhar compara la lectura de Newton con otras experiencias que le llenaron igualmente de admiración: el contemplar el techo de la capilla Sixtina, la actuación de Sir John Gielgud interpretando Hamlet o la Novena Sinfonía de Beethoven dirigida por Arturo Toscanini. A pesar del enorme prestigio de Newton, éste no es aún lo suficiente grande para satisfacerle. "Newton no es uno de los dos o tres mayores científicos de la humanidad. Es una de las dos o tres mejores cabezas, en cualquier tema, que haya dado la historia. Si desea comparar Newton con alguien, ha de buscarlo fuera de la ciencia."

Chadrasekhar confía en terminar su libro muy pronto. ¿Ha pensado en algún nuevo proyecto? "No, éste es el último. No espero hacer ciencia tras acabar el trabajo sobre los *Principia.*" Al expresar mi sorpresa de que alguien que ha estado investigando continuamente de forma tan productiva deje de trabajar, contesta: "Evidentemente puedo continuar realizando trabajo de una calidad inferior a mi nivel habitual, pero ¿para qué? El final ha de llegar cuando yo diga basta".

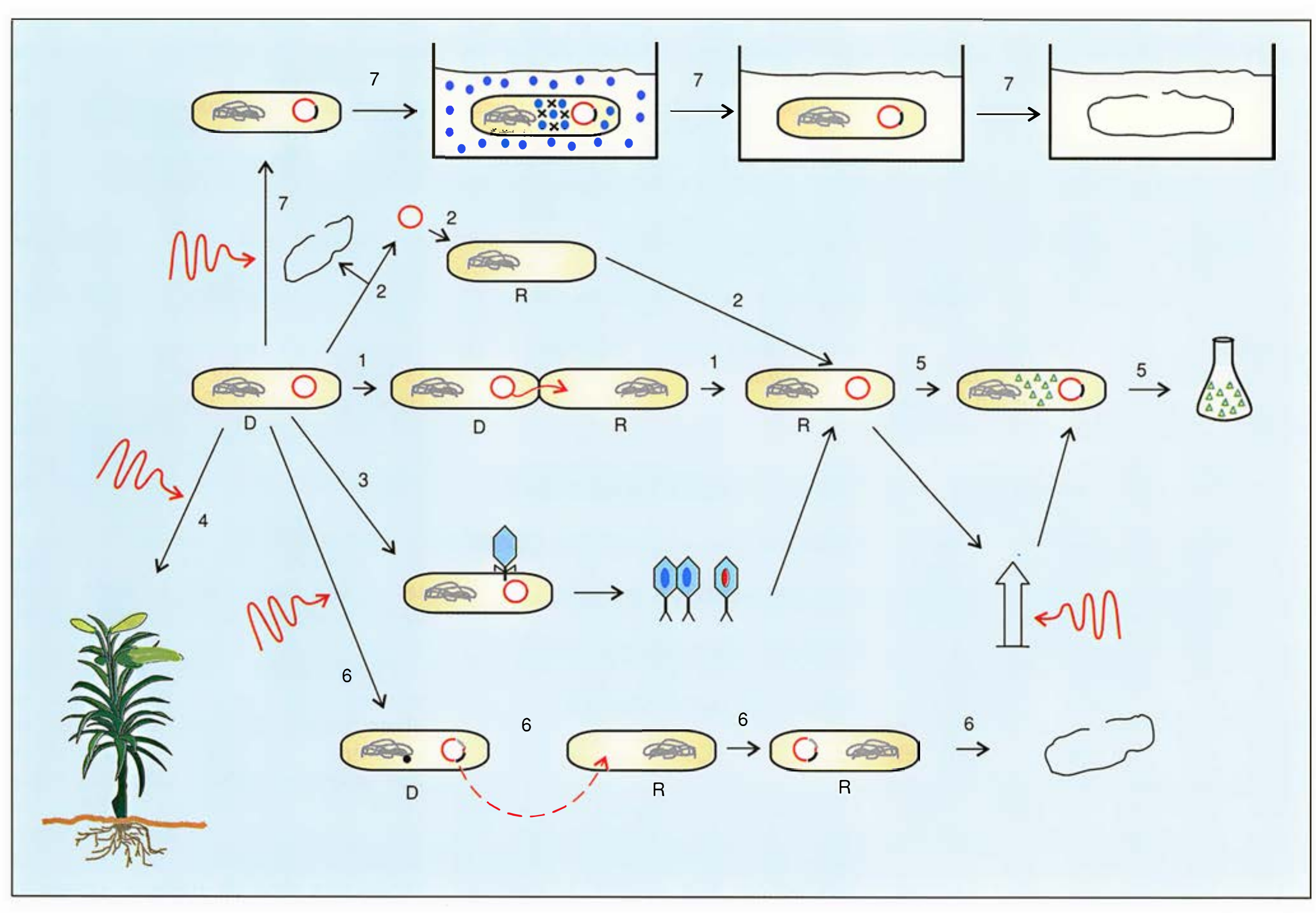
Recuerdo, a este propósito, cierto ensayo, publicado en *Nature* en 1990, en el que Chandrasekhar describe la vida creativa como una lucha constante contra "las inherentes y a veces insuperables limitaciones personales". Concluye el ensayo con un pensamiento de T. S. Eliot: "¿No es verdad que resulta extraño que el hombre posea una consuntiva pasión por realizar algo para lo cual carece de condiciones?"

Plásmidos

De interés general

El material genético de muchos seres vivos se ve enriquecido por la presencia de ADN extracromosómico. Puede éste suponer hasta un 10 % del total de la información del organismo. En el mundo microbiano, parte de la misma se aloja en moléculas de ADN de doble hebra capaces de replicación autónoma: los plásmidos.

Los estudios sobre biología de plásmidos se iniciaron con la identificación de elementos genéticos de este tipo que conferían a gérmenes patógenos resistencia frente a los antibióticos, lo que les dotaba de evidente interés clínico. Más tarde, se comprobó su utilidad como vectores para la clonación de genes. Su importancia se ha redoblado al ponerse de manifiesto la contribución decisiva de los microorganismos al mantenimiento de la biodiversidad. Desde este punto de vista ecológico, destaca el papel de los plásmidos como mediadores de transferencia de infor-



Procesos de intercambio y expresión génica mediados por plásmidos. Una célula bacteriana donadora (D) transfiere su plásmido (círculo rojo) *a una bacteria receptora (R) mediante conjugación (1). La bacteria donadora puede morir y liberar al medio su material genético, el cual será incorporado por otras bacterias mediante un proceso de transformación (2). Puede ocurrir también que la bacteria donadora sufra una infección por bacteriófagos (virus), alguno de los cuales empaquetará y transferirá el ADN plasmídico* (en rojo) *a otras bacterias, mediante transducción (3). El resultado de cualquiera de estos tres procesos de intercambio genético lateral será una bacteria receptora (R) que ha adquirido la información del plásmido. La intervención humana* (flechas onduladas, en rojo) *permite la manipulación, multiplicación ("amplificación") y selección de otros procesos que se desarrollan en la naturaleza con menor frecuencia. A veces, la bacteria donadora se usa para infectar plantas y transferirles información deseada (resistencias a heladas, sequías, insectos), llevada por el plásmido (4). En otros casos, la clonación de genes en plásmidos con múltiples copias permite la producción en masa de proteínas de interés clínico (vacunas, insulina, interferón) (5). La liberación al medio de microorganismos que llevan ADN plasmídico recombinante se pretende controlar mediante sistemas "asesinos" codificados por el mismo plásmido, y neutralizados por el producto de un gen que es clonado en el ADN del microorganismo genéticamente manipulado. La transferencia de estos plásmidos recombinantes a las bacterias indígenas supone la muerte del microorganismo que los recibe (6). Finalmente, como elementos biológicos implicados en la descontaminación, se diseñan bacterias portadoras de ciertos plásmidos que posibilitan la utilización del contaminante como nutriente. Ello conduce a la disminución o desaparición de los niveles de contaminación y a la consiguiente muerte de los microorganismos detoxificadores por falta de nutrientes (7)*

mación genética entre microorganismos de la misma o distinta especie. Por último, los plásmidos son objeto de estudios básicos en biología molecular y constituyen herramientas esenciales en procesos biotecnológicos.

La aparente sencillez de los plásmidos ha posibilitado el avance espectacular registrado en la investigación sobre procesos de transferencia y replicación del ADN y control de la expresión génica. El empleo de plásmidos permite abordar las interacciones entre proteínas y entre proteínas y ADN que acontecen en la replicación y transcripción del material genético.

Otros aspectos de la investigación básica se centran en la comprensión de los mecanismos implicados en la formación de contactos intercelulares que facilitan la transferencia de plásmidos de una célula a otra. Asimismo, revisten particular interés los procesos de transmisión de las señales de apareamiento entre bacterias y la transferencia del ADN plasmídico de la célula donadora a la receptora. Finalmente, los plásmidos cumplen un papel esencial en los estudios sobre la influencia de la topología del ADN (condensación, grado de superenrollamiento, curvaturas intrínsecas o inducidas por la unión de proteínas, generación de estructuras secundarias y terciarias) en diversos procesos biológicos, especialmente en el control de la expresión génica.

En los procesos de transmisión hereditaria mejor conocidos, la dotación genética de los individuos se amplía, modifica y selecciona con el transcurso de las generaciones. Además de esta transferencia vertical, existen procesos de transferencia genética horizontal, en los que individuos de la misma o de diferente especie adquieren información genética que les puede dotar de ventajas selectivas frente a condiciones adversas. Estos intercambios, que ocurren en diversos nichos ecológicos, se ven particularmente aumentados por estrés ambiental, sometidos a selección forzada por la acción del hombre. Como resultado de esta presión selectiva, se favorecerá el dominio de especies cuya dotación genética permita una respuesta más adecuada a cambios de su medio. Con las herramientas actuales de la biología no podemos evaluar el alcance de estos procesos en organismos superiores, ya que su complejidad genética y su elevado tiempo de generación dificultan el análisis.

Gracias a los plásmidos, sin embargo, podemos investigar la transferencia genética horizontal en microorganismos. Al tratarse de elementos dispensables para el huésped, su manipulación no produce alteraciones indeseables. Por otra parte, la capacidad que poseen de colonizar nuevos huéspedes, mediante transformación, autotransferencia o movilización mediada por otros replicones, facilita el intercambio genético entre los microorganismos que comparten un mismo nicho ecológico. Además, este intercambio no se limita a la información contenida en los plásmidos, ya que éstos pueden promover también la transferencia de información cromosómica entre microorganismos. Los primeros resultados han mostrado que existe una asombrosa diversidad entre los microorganismos, debida quizás a un continuo flujo de transferencia de genes entre ellos, generalmente mediada por plásmidos. De aquí se infiere que los plásmidos constituyen un importante reservorio de ADN, acervo compartido por especies muy dispares.

Dada su naturaleza ubicua y su sensibilidad a cambios medioambientales, los microorganismos se convierten en refinados "biosensores" de tales cambios. Así, podrían tomarse medidas de regeneración de un determinado ecosistema en peligro mucho antes de que los cambios no deseados afecten a los organismos superiores (árboles, insectos) que lo pueblan.

Los plásmidos, amén de constituir una fuente continua y eficaz de intercambio genético, transportan numerosos genes de interés; por citar algunos: genes de fijación de nitrógeno atmosférico (de aplicación en agricultura) y genes implicados en rutas metabólicas de importancia en la industria agroalimentaria. Otros plásmidos facilitan la colonización de organismos superiores por bacterias o se les emplea para la selección de variedades de plantas con características genéticas mejoradas.

Es conocido el papel fundamental que los plásmidos han desempeñado en la clonación e hiperexpresión de genes, la manipulación genética y la purificación de ciertos productos; su implicación en sistemas para sintetizar proteínas a gran escala ha permitido determinar la estructura tridimensional de muchas de ellas. Las investigaciones se centran también en la mejora de los vectores de clonación y de los sistemas plasmídicos de hiperproducción, en el desarrollo de plásmidos capaces de integrarse en cromosomas y así estabilizar la herencia de genes de interés, y en el desarrollo de sistemas de transferencia genética de bacterias a organismos eucariotas. En este último aspecto, la transferencia, mediada por plásmidos, de diversos genes (que confieren resistencia frente a los plaguicidas o las heladas, adelantan o retrasan la maduración, etcétera) desde microorganismos hacia las plantas, constituye una de las áreas de mayor actividad.

Sin embargo, el empleo de microorganismos manipulados genéticamente (GEM) en productos alimentarios o su liberación al medio entorno, bien como plaguicidas biológicos o como elementos de detoxificación, rebasa el ámbito científico, para traducirse en un problema social. Las investigaciones contemplan dos vertientes paralelas. En primer lugar, se desarrollan bacterias portadoras de plásmidos que permitan evaluar los riesgos asociados a la liberación de GEM en cultivos de plantas para el consumo. En segundo lugar, se diseñan bacterias con plásmidos recombinantes "autocontenidos", de manera que dichos plásmidos genéticamente manipulados no puedan transferir a los microorganismos indígenas del entorno sin causarles la muerte. Otra línea de trabajo se dirige a la construcción de estirpes bacterianas portadoras de plásmidos que aprovechan los contaminantes como substrato para multiplicarse, generando productos no tóxicos. Una vez realizada la descontaminación activa de suelos o aguas, los microorganismos mueren por carencia de nutrientes.

GLORIA DEL SOLAR
Y MANUEL ESPINOSA
Centro de Investigaciones Biológicas,
CSIC. Madrid.

Realce de imágenes

Reparación del Hubble, alivio para la NASA

"Un ligero cambio en el espejo, un paso gigante en astronomía". Con estas palabras Christopher J. Burrow, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, sintetizaba el estado de ánimo de los astrónomos que en enero de este año mostraron las primeras imágenes nitidísimas del *Telescopio Espacial Hubble*, tras su reparación.

La NASA no desperdició ni un segundo para apuntarse el éxito de la misión espacial de diciembre de 1993, en la que dos astronautas corrigieron la visión borrosa del observatorio espacial. "Se ha corregido ya



Una zona de la gran nebulosa de Orión, una región de formación estelar reciente, captada con una riqueza de detalles sin precedentes en una imagen tomada por la nueva cámara del Hubble. Los colores corresponden a diferentes gases

el *Hubble*", declaró el administrador Daniel S. Goldin, y se ha restablecido el honor cuestionado de la NASA, debió de haber pensado.

En los últimos años la agencia estadounidense ha venido acumulando fracaso tras fracaso, que culminaron en la pérdida del *Mars Observer* en agosto de 1993. El *Hubble* constituía una vergüenza orbitante desde que, a los dos meses de su lanzamiento en 1990, la NASA se percató de que el espejo principal del telescopio estaba deformado por culpa de un defecto de fabricación.

La reparación permitirá al telescopio, de 1500 millones de dólares, cumplir su promesa inicial. La resolución del *Hubble* decuplica la del mejor instrumento instalado en tierra, y gracias a ello puede observar con claridad un volumen de espacio mil veces mayor. Durante la misión también se acomodaron nuevos giroscopios, redes solares y magnetómetros que han mejorado la estabilidad del *Hubble* e introducido una capacidad de apuntado adicional.

Los astrónomos están encantados y esperan como agua de mayo el torrente de datos que aportará el *Hubble*. Dos cambios principales han contribuido a mejorar su capacidad. Uno de ellos es el COSTAR, el paquete de óptica correctiva que transporta diez espejos del tamaño de un botón que se encargan de remediar el error del espejo primario de tres de los instrumentos del *Hubble*: la cámara de objetos débiles, el espectrógrafo Goddard de alta resolución y el espectrógrafo de objetos débiles. Hubo que prescindir de un cuarto instrumento para dejarle sitio al COSTAR. La otra modificación importante tiene que ver con la cámara planetaria de campo ancho (WFPC-2), que corrige el error del espejo primario sin la ayuda de COSTAR. Los espejos del COSTAR correspondientes a la cámara de objetos débiles, así como los del WFPC-2, empezaron a funcionar en cuanto fueron activados y sólo fue necesario realizar un pequeño ajuste para lograr unas prestaciones casi perfectas.

Según Barrows, el funcionamiento del WFPC-2 ha llegado "muy cerca del límite teórico". Entre el 60 y el 70 por ciento de la luz procedente





Nucleo de la galaxia espiral M100 captada por el Telescopio Espacial Hubble *antes (*izquierda*) y después (*derecha*) de la reparación. La cámara planetaria y de campo ancho que tomó la imagen de la izquierda fue reemplazada para corregir el espejo principal*

de una fuente puntual tomada con la cámara cae dentro de un círculo de 0,2 segundos de arco de ancho. Por culpa de la aberración esférica causada por el defecto del espejo primario, el antiguo WFPC sólo podía capturar y concentrar en el mismo círculo un 12 por ciento de la luz de una fuente puntual. Durante la reunión de la Sociedad Astronómica Americana, celebrada en enero, J. Jeffrey Hester, de la Universidad estatal de Arizona, presentó unas imágenes impresionantes, tomadas con la nueva cámara, de R 136, cúmulo de la nebulosa 30 Doradus. El primer WFPC reveló que R 136 encerraba cientos de estrellas; ahora el WFPC-2 es capaz de captar más de 4000 y además ha tomado unas imágenes sorprendentes de Eta Carinae.

Pero esa recompensa se torna chiquita ante la perspectiva de poder determinar el valor de un parámetro cosmológico fundamental: la constante de Hubble. Esta constante —así llamada en honor de Edwin Hubble— relaciona la velocidad de un objeto astronómico con su distancia; nos lleva, pues, directamente a derivar una estimación de la edad del universo. Los astrónomos discrepan, en un factor dos, sobre el valor de la constante de Hubble. Eso quiere decir que la edad del universo no puede calcularse con precisión alguna (se concede que está entre 10.000 y 20.000 millones de años).

Para dirimir la discusión será necesario apuntar hacia las Cefeidas, estrellas variables situadas en galaxias que distan hasta 50 millones de años luz. De acuerdo con lo predicho por Hubble, el que podamos inferir la luminosidad absoluta de una Cefeida a partir de su periodicidad las convierte en útiles mojones cósmicos; las estrellas cuyo brillo es idéntico parecen más débiles cuanto más alejadas. El WFPC primitivo podía detectar las Cefeidas situadas a unos 12 millones de años luz, mientras que su versión 2 distingue, una a una, las estrellas que pueblan la galaxia M100, distante de 35 a 80 millones de años luz. Algunas de estas estrellas bien podrían ser Cefeidas.

Las imágenes tomadas con la cámara de objetos débiles, que el COSTAR les ha conferido la capacidad de enfoque, no son menos sorprendentes. Peter Jakobsen, de la Agencia Espacial Europea, centro que construyó esta cámara, mostró con orgullo una imagen de la supernova SN1987A, en la que destacaba con particular nitidez la bola de fuego central de la estrella en explosión.

Robert Jedrzejewski, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, suscitó la misma reacción con un diagrama recién dibujado del brillo y la temperatura de las estrellas del cúmulo globular 47 Tucanae. La imagen más espectacular fue quizá la aportada por F. Duccio Macchetto, del mismo Instituto: una visión del núcleo comburente de una galaxia Seyfert de tipo 2 denominada NGC 1068. El núcleo, que supuestamente alberga un agujero negro, emite un brillo cuya intensidad es más de mil millones de veces el brillo del sol. Pese a que la materia que cae en su interior oculta al núcleo, la nueva fotografía muestra con gran detalle la estructura que rodea el *infierno* y que antes aparecía como un borrón.

TIM BEARDSLEY

Origen del espín

Del protón

¿En qué cuantía el espín del protón proviene de sus quarks componentes? Pregunte a un experimentador y la respuesta será un 10 por ciento, un 55 por ciento o, lo último, un 35 por ciento. Si no se aclara, acuda a un teórico: las respuestas irán del cero al cien por cien; la mayoría, sin embargo, hablará de un 65 por ciento. No faltarán, entre todos, quienes afirmen que ese porcentaje, designado con la letra Σ, es simplemente incalculable.

El protón se compone de dos quarks arriba ("up") y un quark abajo ("down") unidos mediante gluones. Lo mismo que otras muchas partículas elementales, y al igual que el quark, el protón posee un momento angular intrínseco, o espín, que vale 1/2 (en una unidad cuántica). Ahora bien, al estar el protón formado por quarks, resulta plausible que su espín pueda repartirse en los espines de sus quarks. Sigue abierto el debate sobre la manera de abordar esta disección, mientras el protón espera en la mesa de operaciones. A su lado yace su alter ego, el neutrón; ambos tienen el mismo Σ.

En 1988 los experimentadores del CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, anunciaron que el valor de Σ se situaba en torno al 10 por ciento. Resultado que discrepaba de la mayoría de las predicciones teóricas y provocó una frenética actividad investigadora. En 1993, un grupo del Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) concedía a Σ un 55 por ciento. Los europeos aportaron nuevas pruebas que corroboraban su alegado 10 por ciento. Teóricos y experimentales regresaron a sus mesas y laboratorios. A comienzos del año en curso, la colaboración del CERN dio su último resultado: alrededor del 35 por ciento. El grupo de Stanford espera revelar "*su*" nuevo resultado este verano.

¿Cuánto vale, pues, Σ? Pasará aún cierto tiempo hasta que las nieblas se despejen: las mediciones operan con un elevado margen de error, razón por la cual los resultados son todavía muy imprecisos y confusos. Además, queda mucho por averiguar sobre cómo descomponer el espín del protón.

Los protones son, en efecto, entidades complejas. Sus quarks y gluones interaccionan entre sí de mil formas distintas, descritas por la teoría de la cromodinámica cuántica (QCD). Pero son interacciones de cálculo enrevesadísimo, y los teóricos optan por extraer la esencia de la QCD a partir de modelos más sencillos que después utilizan para hacer predicciones.

En el modelo "naïve" de quarks componentes del protón, uno de los tres gira en sentido opuesto al de los otros dos quarks; cuando sumamos los espines de los tres obtenemos: $1/2 + 1/2 - 1/2 = 1/2$, que es el espín del protón. En este modelo, "*todo*" el espín del protón proviene del espín de los quarks: Σ vale el 100 por cien. Modelos más complejos permiten que los quarks orbiten unos a otros; entonces parte del espín del protón proviene del momento angular orbital de los quarks y aproximadamente sólo un 65 por ciento proviene del espín de los mismos. John Ellis, del CERN, y Robert L. Jaffe, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han predicho un Σ del 60 por ciento. Se basan en cierta exposición de la QCD que considera iguales las masas de los quarks arriba, abajo y extraño ("strange"), mientras que deja de lado la contribución a Σ de los quarks extraños creados espontáneamente.

De ninguno de esos cálculos se fía el grupo de Alfred H. Mueller, de la Universidad de Columbia. Aducen que los gluones se entremezclan con los quarks de tal forma, que no hay manera de poder predecir la contribución al espín de los quarks sueltos. En el otro extremo del debate se encuentra el modelo de Skyrme, que contempla el protón como una ondulación de un campo cuántico; da un valor de Σ del 0 por ciento.

"El problema" señala Xiangdong Ji, del MIT, "es que nos falta un

buen modelo del protón". Los teóricos están de acuerdo, al menos, en un aspecto: la contribución a Σ de un quark arriba debe ser bastante parecida a la de un quark abajo. Si los experimentos demuestran lo contrario, violando una predicción de James D. Bjorken, de SLAC, de 1966, la propia QCD quedará en entredicho. La disparidad de resultados obtenidos en el CERN y en el SLAC amenazan con dar ese golpe. Todo indica que el protón seguirá aguardando en la mesa de operaciones.

MADHUSREE MUKERJEE

Células sanguíneas

Examen in vivo

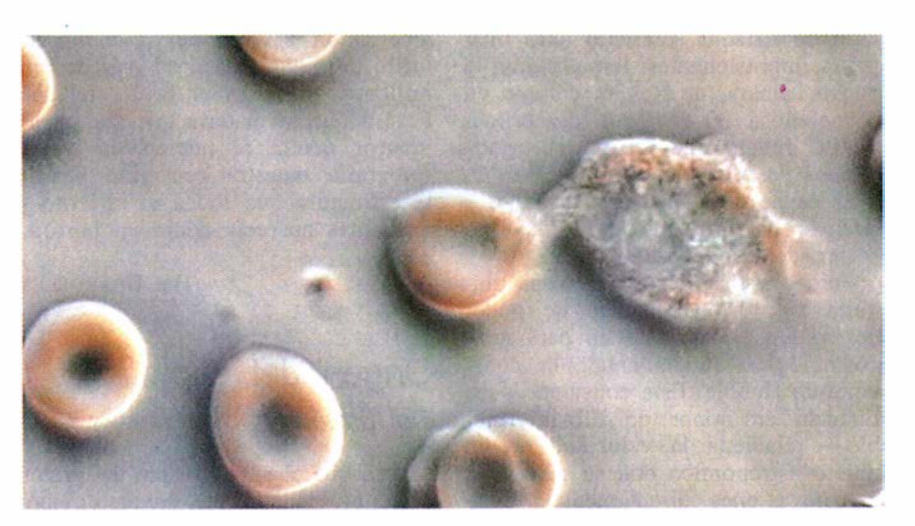
La analítica hemática informa sobre la cantidad absoluta o porcentual de cada uno de los distintos tipos celulares en una determinada muestra de sangre. La desviación de los valores considerados normales es signo de un estado de enfermedad. Pero al matar y decolorar las células, perdemos la posibilidad de determinar si eran o no funcionales. Lo ideal sería poder observarlas vivas.

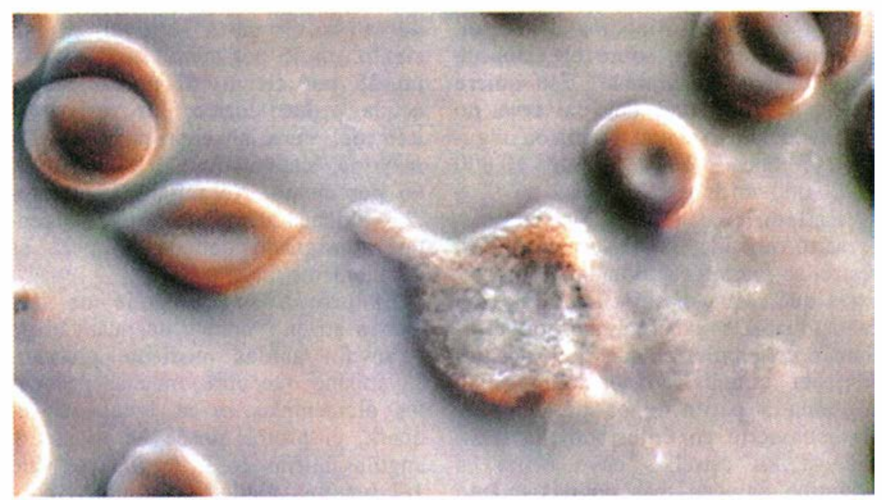
Un equipo de investigación del Hospital Clínico de la Universidad de Erlangen trabaja en esa línea en el marco del proyecto "Investigación básica para la clínica". Los científicos filman con una cámara de vídeo muestras sanguíneas frescas que estudian en una cámara hermética a temperatura corporal y con la ayuda de un microscopio óptico Ergonom 400. Destaca la altísima resolución y una gran profundidad de campo, variable. También puede realizarse una especie de tomografía microscópica.

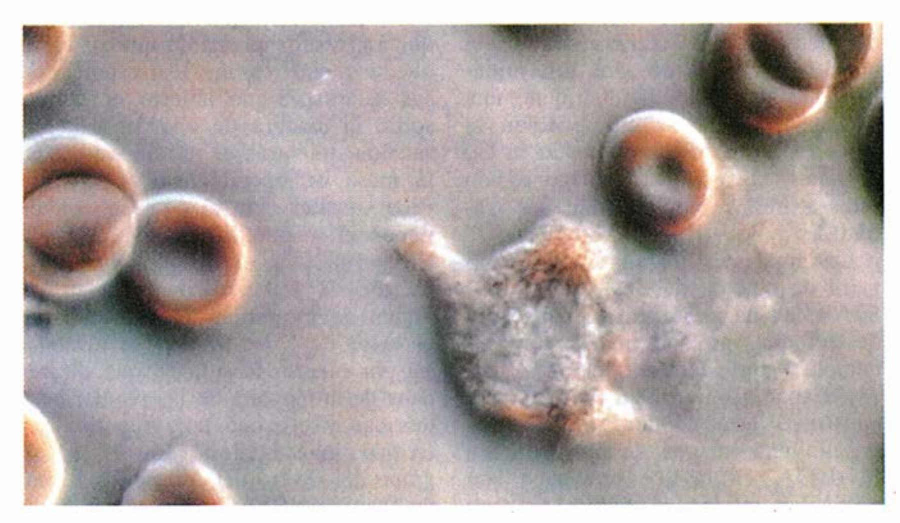
Ha llamado la atención, sobre todo, el contacto activo entre los granulocitos y los eritrocitos. Aproximadamente dos tercios de los leucocitos circulantes son granulocitos, cuyo nombre deriva de los numerosos gránulos cargados de sustancias activas que presentan en su citoplasma. Estas pequeñas células fagocitarias intervienen en procesos de defensa frente a desencadenantes de enfermedad y producen factores mediadores de la inflamación; algunos originan fiebre, aumentan la sensación de dolor o estimulan la cooperación de las células del sistema inmunitario.

Flotando, como magnetizadas, las proyecciones de los granulocitos parecen deslizarse sobre la superficie de los eritrocitos. En algún momento dan la impresión de anclarse entre sí y moverse a lo largo de cierta trayectoria. El objeto de estos contactos permanece todavía oscuro. Se atribuyen a la detección de material extraño o a un intercambio de información que, tal vez, produzca alteraciones en el estado de carga de la membrana eritrocitaria. Sea como fuere, lo cierto es que, en las muestras, los glóbulos rojos, planos, se adhieren a los granulocitos, más voluminosos y menos propensos al contacto.

Si se conociesen las interacciones entre los distintos tipos celulares en una gota de sangre podrían controlarse mejor varios fenómenos. Por ejemplo, comprobar si cierto medicamento altera las relaciones intercelulares descritas, torna normal un comportamiento celular anómalo o







Interacción entre un granulocito y un eritrocito (de arriba abajo)

constituye un refuerzo transitorio de algún proceso favorable, como la fagocitosis de desencadenantes de enfermedad.

ULRICH G. RANDOLL
Hospital Clínico de la Universidad de Erlangen-Nürenberg.

Caos

Absoluto

Los estudiosos del caos se han aferrado a la idea según la cual los sistemas caóticos mantendrían retazos de orden. Se manifestarían éstos en forma de un atractor, una pauta de comportamiento hacia la que tendería periódicamente el sistema. La identificación del atractor permite predecir el comportamiento final de un sistema caótico, al menos en un sentido cualitativo y estadístico. Contra esa hipótesis acaban de lanzar un obús Edward Ott, de la Universidad de Maryland, y John C. Sommerer, de la Universidad Johns Hopkins, y quienes con ellos trabajan. Han demostrado que, en ciertos sistemas que tienen más de un atractor, resultan imposibles hasta las predicciones cualitativas.

El problema radica en la manera en que un sistema caótico determina qué atractor seguir. De las condiciones iniciales que controlan la elección se dice que se encuentran en una cuenca de atracción. Pero Ott y Sommerer arruinan esa situación al demostrar que una cuenca puede experimentar fugas: puede tener "agujeros" que hagan imposible predecir hacia qué atractor irá el sistema.

Apoyados en trabajos matemáticos anteriores, los físicos utilizaron un ordenador para realizar experimentos numéricos en los que una partícula que se movía por una superficie con rozamiento sufría ocasionales empellones. A causa de ello, la partícula podía moverse periódica o esporádicamente. Así descubrieron que, ni siquiera para un sistema de tamaña sencillez, no podían determinar hacia cuál de los dos atractores se precipitaría la partícula, ya que una cuenca está salpicada con fragmentos de la otra. La verdad es que cualquier zona de una cuenca, con independencia de cuán pequeña sea, contiene en su interior trozos de la otra cuenca. "En consecuencia, bastan cambios arbitrariamente pequeños para que el sistema se encamine hacia el otro atractor", señala Ott. La única manera de garantizar un resultado es no tener ninguna clase de error o de ruido, una imposibilidad práctica para los sistemas reales. Además, ¿qué clase de caos sería éste?

Ott señala que los resultados difieren de otras formas de caos en las que el punto de partida cabalga en el límite entre las dos cuencas de atracción. En tales situaciones de frontera, deberíamos quizá poder separar el punto de partida de la línea limítrofe y predecir, por ende, el atractor. Pero esa posibilidad no cabe en sistemas que tienen cuencas agujereadas, ya que no hay ninguna región libre de agujeros.

Aunque las cuencas agujereadas aparecen sólo en situaciones que tienen ciertas simetrías espaciales, tal vez no sean tan raras. "Gran parte de la física se basa en leyes de conservación que se fundan en simetrías", observa Sommerer. El y Ott se hallan ahora a la búsqueda de fenómenos físicos reales que tengan cuencas agujereadas. Sospechan que entre tales sistemas se den fluidos turbulentos, mezclas químicas y láseres. A Sommerer no le extrañaría que los experimentalistas hayan encontrado ya esta clase de caos. Los proyectos que fracasaron al repetirse podrían haber sido el resultado de una maliciosa propiedad de las cuencas agujereadas. "Tengo la secreta sospecha de que en algunos casos ha ocurrido algo así", declara.

PHILIP YAM

Meteorito artificial

¡Banzai!

Los viejos satélites no mueren, tan sólo se desvanecen. Cuando en 1993 el Instituto japonés de Ciencia Espacial y Astronáutica (ISAS) decidió dar de baja a su satélite *Hitin* le salió del alma el espíritu de los samurais. Antes de entregarlo, para su perdición, a la inmensidad de la galaxia, instaría su "suicidio" contra la Luna. El 10 de abril, cuando la sonda de 143 kilos chocó, a una velocidad superior a los 9000 kilómetros por hora, explotó creando un intenso destello de luz, levantando polvo y cavando un cráter que los astrónomos esperan pueda servir de nuevo punto topográfico para la ciencia planetaria.

Hakan Svedhem, físico adscrito a la Agencia Espacial Europea, se enteró de los planes de la ISAS dos semanas antes de su fecha de ejecución y se apresuró para convencer a los astrónomos de que esa noche apuntaran sus telescopios en dirección a la Luna. "Era una inmejorable oportunidad para observar desde la Tierra un impacto gigantesco", comentó.

Tres observatorios de diferentes puntos del globo decidieron colaborar. Pero a medida que el satélite kamikaze se precipitaba hacia su autoinfierno, uno de los telescopios, el situado en Irkutsk, dejó de funcionar por problemas técnicos; a otro, de Indonesia, una lluvia inoportuna le obligó a abandonar. David Allen, astrónomo del Observatorio Angloaustraliano, era la última esperanza. "Si alguien era capaz de hacer una toma así, sería David", explica Alistair Classe, del Observatorio Real de Edimburgo. Sin embargo, debido a un error en la comunicación de la hora a la que tendría lugar el impacto, Allen no sabía que estaba trabajando con retraso.

Segundos antes de la colisión, Allen puso en marcha las cámaras que se habían montado en el espectrómetro de imagen infrarroja del observatorio y realizó media docena de tomas en el instante en que la noche lunar se inundó de luz. La intensidad de la explosión y la aparente ausencia de una nube de gas de proporciones considerables hizo sospechar a Glasse que *Hitin* había chocado contra una superficie rocosa, convirtiendo casi toda su energía cinética en calor y luz. Svedhem subraya, sin embargo, que, debido a que el punto del impacto se hallaba en el lado oscuro de la Luna, a 10 kilómetros de la línea de terminación entre el día y la noche, la obscuridad podría haber velado una gran nube de polvo.

La nave suicida había sido diseñada para entrenar a los astronautas japoneses en el tránsito lunar, de cara a una misión conjunta con la NASA. Bautizado con el nombre de *Hitin* (diosa de la música) después de su lanzamiento, el 24 de enero de 1990, el satélite superaba su esperanza de vida de un año; después de permanecer un segundo año en alta órbita terrestre se le envió a girar alrededor de la Luna. Svedhem aprovechó ese viaje para recoger datos sobre el polvo cósmico.

Con su muerte, el satélite podría haberse convertido en un excepcional experimento controlado. "La correlación entre el tamaño y la velocidad de un meteorito y el tamaño del cráter que produce se basa en cálculos teóricos y nunca ha podido ser verificada por la observación", explica Svedhem. "En este caso, tenemos una masa y una velocidad muy bien definidos, aunque todavía, naturalmente, no podemos ver el cráter, ya que es demasiado pequeño". Se espera que el sucesor de *Hiti*n visite su tumba y que transmita imágenes del cráter.

W. WAYT GIBBS

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Clínido ante el espejo

Por mucho que lo intento, no consigo fotografiar peces migratorios. Me gustaría hacerlo con dos especies de *Seriola*, *S. quinquelandiata* y *S. dumerilii.* Embellecen a su paso las aguas del mar de Izu. Pero siempre andan afanadas e inquietas. Para obtener una buena fotografía, el pez ha de ayudar.

Los clínidos, más aposentados, ofrecen múltiples posibilidades para provocar en ellos reacciones que saquen a la luz su escondida manera de ser. De talla discreta y cuerpo comprimido, *Neoclinus bryope* asoma avizor la cabeza del refugio en que anida. Es la hora de la pitanza, de alimentarse del plancton arrastrado por el agua.

Bajo esa apariencia de timidez expectante, late la fiereza del más conspicuo de los comportamientos territoriales. El dominio de una zona acotada es una forma de persistencia de la reproducción en el tiempo. Coloqué un espejito delante de la salida del clínido. Ante la súbita presencia del supuesto competidor, se transformó encolerizado. Sacó cuerpo, abrió la boca cuanto pudo, erguió la aleta, brillaron todas las escamas de su piel y retó al "intruso". Nunca viera duelo igual contra uno mismo.

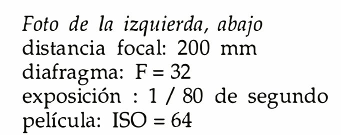

Foto de la izquierda, abajo
distancia focal: 200 mm
diafragma: F = 32
exposición : 1 / 80 de segundo
película: ISO = 64





Foto de la derecha
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 11
exposición: 1 / 80 de segundo
película: ISO = 25



Foto inferior
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1 / 60 de segundo
película: ISO = 25

El manto terrestre suboceánico

Muestras recogidas del fondo oceánico revelan en qué medida las fuerzas de convección del manto modelan la superficie terrestre, crean su corteza y quizás afectan incluso a su rotación

Enrico Bonatti

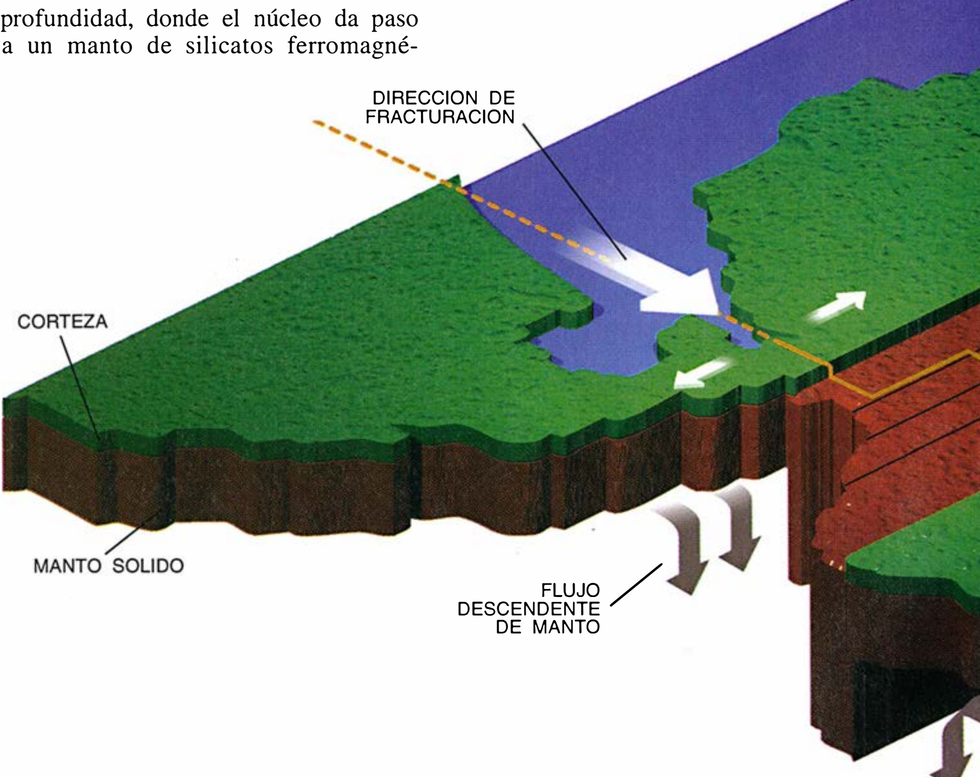
Ante un globo terráqueo sentimos la tentación de suponer que continentes y océanos son elementos eternos e inmutables de la superficie terrestre. Los geofísicos saben que tal "permanencia" es mera ilusión, explicable por la brevedad de la vida humana. Durante millones de años, los bloques que constituyen la rígida capa exterior de la Tierra, la litosfera, se han estado moviendo, separándose en las dorsales mesooceánicas, deslizándose en sentido opuesto en las fallas y chocando en los márgenes de alguno de los océanos. Estos movimientos producen la deriva continental y determinan la distribución planetaria de terremotos y volcanes.

Pese a estar bien asentada la teoría de la tectónica de placas, el motor que impulsa el movimiento de las placas litosféricas sigue escapándose a los análisis fáciles. Para hacer frente a esta dificultad, hemos centrado nuestro trabajo en las dorsales mesooceánicas, estructuras grandes e impresionantes donde se abre el fondo oceánico. El examen de la composición, la topografía y la estructura sísmica a lo largo de las dorsales aporta resultados que a menudo contradicen los datos esperados. Los procesos químicos y térmicos acaecidos en el manto que subyace bajo las dorsales mesooceánicas determinan la cuantía de nueva corteza oceánica que debe formarse. La actividad del manto podría también provocar la aparición de diferentes tipos de islas en medio del mar y la formación de fosas profundas en los márgenes oceánicos. La potencia de tales procesos podría llegar a ejercer un sutil efecto sobre la rotación del planeta.

La idea de un interior dinámico arranca quizá del siglo XVII. En los *Principios de filosofía*, que publicó en 1664, René Descartes postulaba la existencia de un núcleo central compuesto por un fluido primigenio, parecido al solar, rodeado de una capa sólida opaca. Sucesivas capas concéntricas de roca, metal, agua y aire integraban el resto del planeta.

Los geofísicos suscriben todavía el modelo de una Tierra en capas, si bien sus ideas han evolucionado bastante desde el siglo XVII. De acuerdo con la doctrina al uso, la Tierra posee un núcleo interno sólido y un núcleo externo fundido, constituidos por aleaciones ricas en hierro. La composición de la Tierra cambia bruscamente hacia los 2900 km de profundidad, donde el núcleo da paso a un manto de silicatos ferromagnésicos sólidos. Otra discontinuidad significativa, situada 670 kilómetros por debajo de la superficie, señala el límite entre el manto inferior y el superior (límite a través del cual cambia la estructura reticular de los minerales del manto debido a la presión). La discontinuidad de Mohorovicic, o Moho, separa el manto, denso, de la corteza; esta importante transición se sitúa de 30 a 50 km por debajo de la superficie de los continentes y a menos de 10 bajo el fondo marino en las cuencas oceánicas. La litosfera abarca la corteza y la parte superior del manto; las placas rígidas que la constituyen se apoyan sobre la astenosfera, parte inferior, más caliente y plástica, del manto.

Esta ordenada estructura en capas sugeriría un interior estático. Nada



ENRICO BONATTI trabaja, desde 1975, en el Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia. Ha participado en expediciones por todos los grandes océanos y algunas tierras remotas de interés geológico.

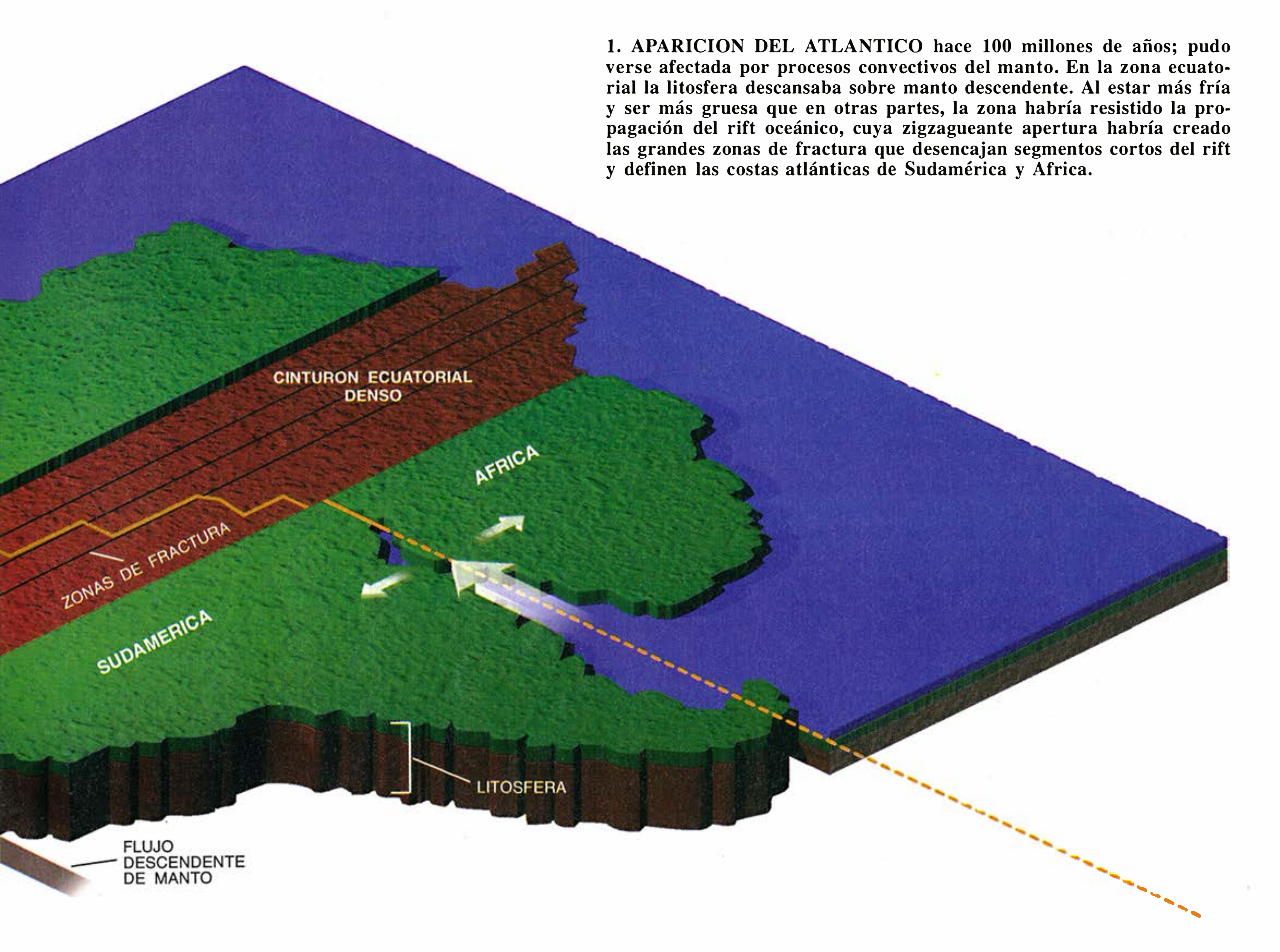
más contrario a la verdad. Las profundidades terrestres son muy dinámicas. La energía térmica sobrante de la época de formación de la Tierra, aumentada por la energía liberada durante la desintegración radiactiva del uranio y el torio, agitan el material del interior del planeta. El calor se propaga a través de sus límites internos y pone en movimiento enormes corrientes de convección que transportan las regiones calientes hacia arriba y las frías hacia abajo. A la larga, esos procesos originan fenómenos geológicos de superficie muy notables: formación de montañas, vulcanismo y movimiento de los continentes.

Entre las regiones que ofrecen el mejor acceso al interior de la Tierra se cuentan las dorsales mesooceánicas, que dividen los grandes océanos. Constituyen un sistema que circunda el planeta, a la manera de las costuras de un balón, alcanzando un total de más de 60.000 kilómetros de longitud. La dorsal mesoatlántica es una parte de este sistema planetario de dorsales. Inmensa cicatriz rocosa que recorre de norte a sur el suelo oceánico, se va generando al paso que el Atlántico oriental se va distanciando del occidental, en torno a un centímetro por año. Además de los frecuentes terremotos que tienen su origen allí, la cima de la dorsal mesoatlántica arroja magma caliente durante sus frecuentes erupciones volcánicas. El magma se enfría y se solidifica, formando así nueva corteza oceánica. La dorsal es más alta que el resto de la cuenca atlántica; la profundidad del suelo marino respecto al nivel del mar crece con la lejanía de la dorsal, por la razón presumible de que la placa litosférica que constituye el fondo del Atlántico se contrae a medida que se va enfriando con el tiempo.

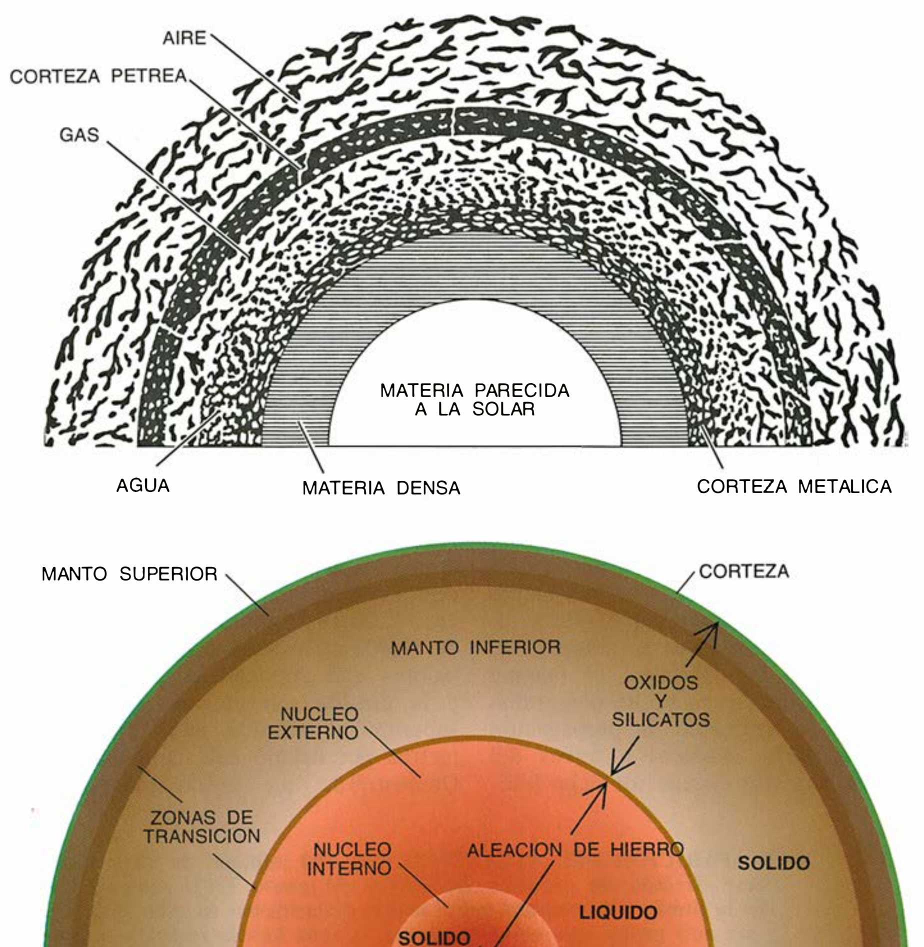
El magma que asciende por la dorsal mesoatlántica nace en el manto superior. Ese material que aflora difiere bastante del que se compone el manto. En las dorsales, el magma forma basalto, pero se ha comprobado que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas a través del manto superior excede los ocho kilómetros por segundo, muy por encima de la velocidad con que atravesarían la roca mencionada.

El único material que admitiría una velocidad de propagación tan alta sería la peridotita, roca densa y verde oscura, que consta principalmente de tres minerales silícicos: olivino (un silicato denso que contiene magnesio y hierro), ortopiroxeno (parecido al anterior, pero menos denso) y clinopiroxeno (que incorpora algo de aluminio y más del 20 por ciento de calcio). Las peridotitas tienen además pequeñas cantidades de espinela (óxido de cromo, aluminio, magnesio y hierro).

¿Cómo puede producirse magma basáltico a partir de un manto de peridotita? Hace más de 20 años, Alfred E. Ringwood y David H. Green expusieron muestras de peridotita a temperatura y presión elevadas, 1200-1300 grados Celsius y más de 10.000 atmósferas, respectivamente, valores que duplican la temperatura y la presión reinantes en el manto superior suboceánico, unos 100 kilómetros por debajo del suelo marino. Demostraron que la descompresión



1. APARICION DEL ATLANTICO hace 100 millones de años; pudo verse afectada por procesos convectivos del manto. En la zona ecuatorial la litosfera descansaba sobre manto descendente. Al estar más fría y ser más gruesa que en otras partes, la zona habría resistido la propagación del rift oceánico, cuya zigzagueante apertura habría creado las grandes zonas de fractura que desencajan segmentos cortos del rift y definen las costas atlánticas de Sudamérica y Africa.



2. INTERIOR DE LA TIERRA según Descartes (*arriba*): un núcleo fluido caliente, cubierto por un sólido opaco y denso, sobre el que se asentaban capas de metal, agua, gas, piedra y aire. Según la concepción moderna (*abajo*), el núcleo interno, sólido, está rodeado de un núcleo externo fundido, ambos compuestos por una aleación de hierro. El manto consta de silicatos y óxidos sólidos de hierro y magnesio.

gradual de la roca a tales temperaturas inducía la fusión de hasta el 25 por ciento. La materia fundida tenía una composición basáltica parecida a la observada en las lavas de las dorsales mesooceánicas.

Los resultados experimentales avalan la idea según la cual, bajo las dorsales se produce ascenso de material peridotítico caliente desde profundidades superiores a los 100 kilómetros por debajo del fondo oceánico. En su recorrido ascendente, las peridotitas del manto experimentan descompresión y fusión parcial; la parte fundida empieza a constituir el magma basáltico y se separa de la peridotita sin fundir, para emerger rápidamente a la superficie. Parte de la masa fundida derrama su erupción por el suelo marino, a lo largo de la cresta de la dorsal mesooceánica, donde se enfría, se solidifica y se agrega a la cima preexistente. El resto se enfría y se solidifica lentamente por debajo de la superficie, dando lugar a corteza oceánica nueva.

Si el modelo esbozado se cumpliera por toda la dorsal mesoatlántica, la profundidad de la cresta bajo el nivel del mar se mantendría uniforme en toda su extensión. Esta profundidad indicaría un nivel de equilibrio determinado por la temperatura y la composición inicial del manto superior subyacente bajo la dorsal.

Si del modelo pasamos a la realidad, semejante regularidad resulta inverosímil en las dorsales. Bastarían pequeñas variaciones en la temperatura del manto para que se fueran desarrollando crestas de distinta altura. En las regiones del manto suboceánico donde las temperaturas son más elevadas la densidad es menor y mayor, en consecuencia, la altura de las cumbres de la dorsal. Sin olvidar que un manto más caliente se fundiría también más y produciría una corteza basáltica de grosor mayor.

La cima de la dorsal mesoatlántica muestra este tipo de variaciones de profundidad bajo el nivel del mar; así, entre 35 y 45 grados de latitud norte existe un área de topografía de altura anormal. Los satélites orbitales han detectado en la misma región un abombamiento al nivel del geoide (nivel de equilibrio de la superficie terrestre, que podemos asimilarlo al nivel medio del mar).

Suele atribuirse dicho abombamiento a la influencia de un punto caliente centrado en el archipiélago de las Azores. Zonas de topografía escarpada e intensa actividad volcánica, se cree que el origen de los puntos calientes está en unas temperaturas insólitamente altísimas del manto; asimismo, la mayoría de las islas oceánicas, Hawai e Islandia entre ellas, serían expresiones superficiales de puntos calientes, cuyas fuentes de calor se hallarían en las profundas zonas limítrofes del interior del planeta, incluida la frontera del manto con el núcleo.

Nos propusimos comprobar esta teoría explorando la relación existente, a lo largo de la dorsal mesooceánica, entre la topografía y la temperatura, estructura y composición del manto subyacente. Para obtener dicha información podíamos examinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas a través del manto subdorsal. O podíamos indagar las variaciones locales observadas en la composición química de los basaltos que manaron a lo largo del eje de la cadena montañosa. Tales variaciones nos llevan a conocer el alcance de la fusión y la naturaleza física de la fuente originaria.

Opté por un tercer procedimiento: la recogida de muestras de peridotitas del manto. Va quedando algo de peridotita, a modo de residuo sólido, conforme el magma basáltico se va fundiendo a partir de las rocas del manto superior. Las rocas del manto yacen sepultadas bajo varios kilómetros de corteza oceánica, pero a veces puede accederse a bloques de peridotita del manto superior. Suelen darse allí donde el eje de la dorsal sufre desencajamientos laterales por culpa de fallas transformantes; aparecen también en puntos de la vecindad del suelo marino hasta donde han llegado las rocas del manto, lo que nos permite extraer muestras mediante sondeos, dragados o recogida directa desde un sumergible.

En 1989, durante una expedición organizada por Jean-Marie Auzende, de la Institución Oceanográfica

IFREMER, nos servimos de un pequeño sumergible para recoger muestras de una sección del manto superior de la zona transformante Vema del Atlántico, diez grados al norte del ecuador. Una falla transformante, que abre un profundo valle a través de la corteza oceánica, desencaja allí el eje de la dorsal mesoatlántica a lo largo de unos 320 kilómetros. Nuestra intención era bajar al fondo marino (a más de cinco kilómetros) en el sumergible *Nautile* para explorar las paredes de este valle transformante. Esperábamos hallar un afloramiento nítido de un corte de manto y corteza. La mayoría de nuestros colegas contemplaba el proyecto con escepticismo: suponíase que, junto a una falla transformante, la serie normal del manto superior y la corteza está completamente trastocada.

No nos arredramos. Iniciamos una sucesión de inmersiones empezando por la base de una pared del valle y fuimos remontando la ladera. Cada inmersión duraba unas doce horas, la mitad de las cuales se las llevaban el descenso y la emersión.

En nuestra primera inmersión corroboramos que la base del corte estaba constituida por peridotita del manto. El segundo día descubrimos, sobre la peridotita, una capa de gabros: rocas que se forman bajo el suelo oceánico a medida que el magma basáltico se va enfriando lentamente. Se acepta que los gabros son el componente principal de la parte inferior de la corteza oceánica.

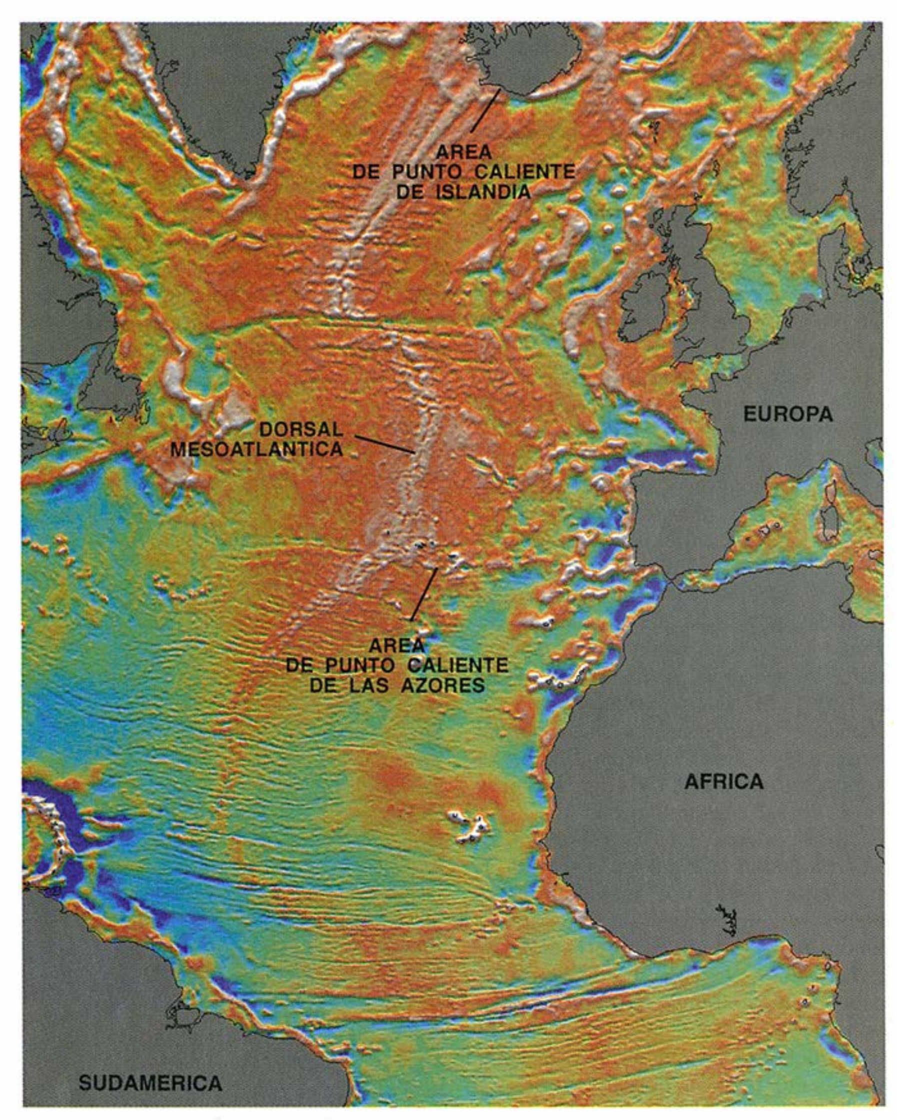
Al día siguiente proseguimos desde el nivel alcanzado el precedente. Conforme el *Nautile* avanzaba por el talud, a ras del fondo marino, fue surgiendo gradualmente ante mis ojos una espectacular formación rocosa, un complejo de diques; era la primera vez que se observaba en el fondo marino. Estos complejos los genera, en la superficie del suelo, material fundido caliente que procede del manto a través de múltiples fisuras finas abiertas en la corteza.

El complejo de diques, de un kilómetro aproximado de grosor, estaba coronado por una capa de basalto almohadillado, forma que adquiere el magma basáltico cuando se enfría y solidifica rápidamente al hacer erupción sobre el fondo marino. En las jornadas siguientes exploramos un corte diferente y confirmamos los hallazgos obtenidos. Nuestro entusiasmo estaba justificado: era la primera vez que alguien observaba una serie completa y apenas alterada de manto superior y corteza oceánicos.

Durante las inmersiones, el brazo mecánico del *Nautile* recogió muestras de peridotita del manto. Con otras muchas de la dorsal que habían reunido diversos geólogos y yo mismo nos aprestamos a buscar heterogeneidades regionales en la composición química del manto superior.

Para analizar los minerales del manto en las muestras de peridotita del Atlántico, utilicé, con Peter J. Michael y Monique Seyler, una microsonda electrónica, aparato que dirige un rayo de electrones de escasos micrometros de diámetro sobre una lámina de roca. En respuesta, el mineral emite rayos X de longitudes de onda características que, analizadas junto con sus intensidades, permiten determinar la composición química del mineral. En colaboración con Nobumichi Shimizu, usamos también una microsonda iónica para establecer la concentración de elementos traza (titanio y circonio, por ejemplo) y tierras raras. La sonda iónica arroja, focalizado, un haz de iones contra una muestra, que provoca el desalojamiento de otros iones de la muestra a medir. El método nos permitió conocer la concentración de elementos traza en cantidades de hasta unas pocas partes por mil millones.

Estos análisis desentrañan las condiciones reinantes en la parte del manto donde se formaron las muestras, ya que allí las temperaturas y las presiones crean composiciones inconfundibles en las peridotitas. Green y A. Lynton Jaques y otros petrólogos han demostrado que la fusión parcial modifica la concentración relativa de los minerales originales en la perido-



3. IMAGEN DE SATELITE del Atlántico Norte. Revela la topografía del fondo marino. Se utilizó el radar para medir las variaciones de nivel del mar, que se corresponden con abombamientos y depresiones submarinas. Se destaca la dorsal mesooceánica, que adquiere mayor potencia en amplias plataformas encima de los puntos calientes asociados con Islandia y las Azores. Una gran zona de fractura corta la dorsal entre los puntos calientes.

tita. Algunos, como el clinopiroxeno, se funden con mayor facilidad que otros y, por consiguiente, su concentración mengua rápidamente durante la fusión. Además, el proceso de fusión parcial cambia la composición de los minerales originales: ciertos elementos, así aluminio y hierro, tienden a permanecer en la materia fundida. Su concentración en los minerales disminuye conforme prosigue la fusión. Otros elementos, como el magnesio y el cromo, tienden a quedarse, de manera que el residuo sólido se enriquece en ellos. En virtud de la fusión parcial, el olivino (un silicato de hierro y magnesio) se enriquece en magnesio y se empobrece en hierro; el ortopiroxeno y el clinopiroxeno pierden parte de su aluminio; aumenta la razón de cromo a aluminio en la espinela, y así por demás.

Nuestros datos demostraron la existencia de importantes variaciones regionales en la composición del manto. Por ejemplo, la proporción de cromo a aluminio, en la espinela, es máxima en las peridotitas recogidas de una extensa zona situada entre los 35 y los 45 grados de latitud norte, lo que induce a pensar que el grado de fusión del manto superior subyacente a dicha región puede alcanzar hasta el 25 por ciento. En casi todas partes se funde de un 10 a un 20 por ciento de manto durante el ascenso. Esta área de fusión por encima de la media corresponde a la región de punto caliente de las Azores, lo que respalda la teoría según la cual los puntos calientes resultan de plumas de manto que manan a una temperatura altísima y desde las profundidades del interior terrestre. La tesis recibe el apoyo de otros trabajos, entre los que destaca el de Henry J. B. Dick, quien también estudió las peridotitas oceánicas, y el de Emily M. Klein, colaboradora de Charles H. Langmuir; estos dos abordaron, de manera independiente, la composición química de los basaltos de la dorsal mesoatlántica.

Diríase, pues, que la causa de semejante fusión es un punto caliente. Y en efecto, dando por sentado que la temperatura explicaba por sí sola la fusión en la región de punto caliente de las Azores, calculamos que el manto del punto caliente debería hallarse a unos 200 grados C por encima de lo experimentado en cualquier otra zona subyacente bajo la dorsal.

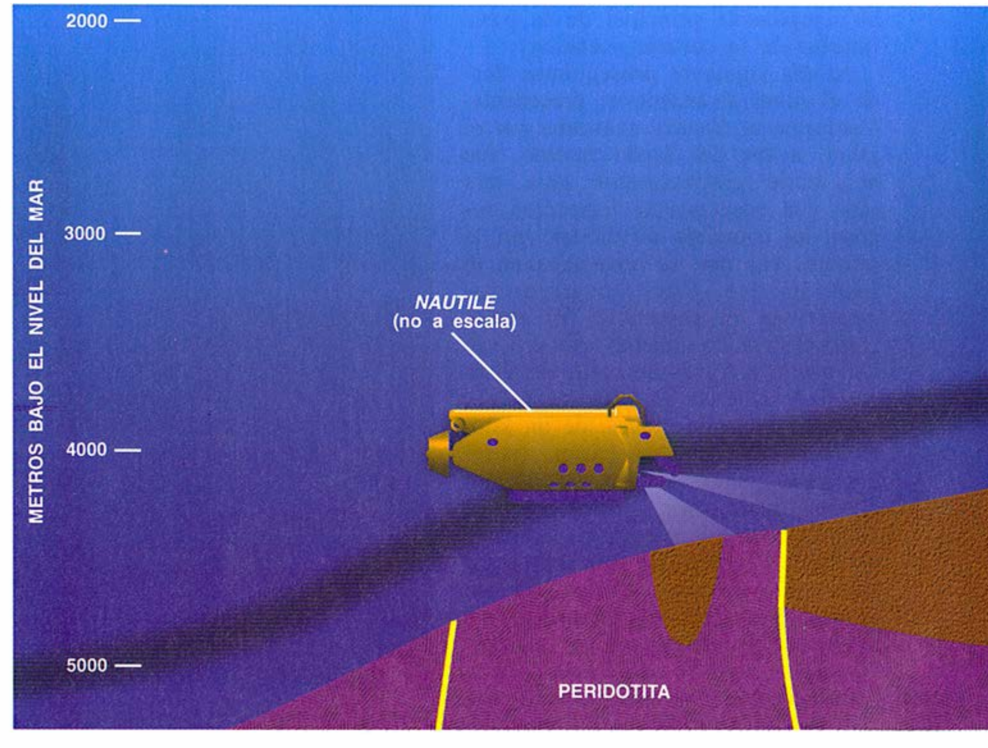
¿Cómo comprobar la validez de la estimación de la temperatura y la hipótesis en que se basa? Se han propuesto diversos geotermómetros, fundados en la observación de ciertos pares minerales que coexisten en equilibrio en el manto y que experimentan reacciones químicas ligadas a la temperatura. Así, el ortopiroxeno y el clinopiroxeno de una peridotita del manto reaccionan entre sí hasta alcanzar una composición de equilibrio que depende de la temperatura. Esta relación se ha calibrado en experimentos de laboratorio. La determinación de la composición del par mineral coexistente puede, pues, indicar la temperatura a la que los miembros del par alcanzaron el equilibrio.

Apliqué dos geotermómetros a las peridotitas mesoatlánticas, uno diseñado por Donald H. Lindsey y el otro por Peter R. A. Wells. Obtuve unos resultados sorprendentes: no evidenciaron temperaturas superiores en la región del punto caliente; si acaso, temperaturas ligeramente inferiores.

¿A qué se debe que no halláramos temperaturas más elevadas en una región del manto donde la fusión es intensa? Un motivo plausible sería que la composición del manto superior promueva allí una fusión más fácil. El agua podría ser el factor principal. Peter J. Wyllie, Ikuo Kushiro y otros han demostrado experimentalmente que la temperatura de fusión cae en presencia de cantidades traza de agua y de otros elementos volátiles en la peridotita. Si un manto "húmedo" asciende bajo un tramo de dorsal mesooceánica, empezará a fundirse a una mayor profundidad que un manto "seco" normal. Cuando la peridotita así formada alcance la superficie, habrá experimentado un grado de fusión bastante mayor que la correspondiente a un manto seco a temperaturas similares.

¿Existe alguna prueba de que el manto superior subyacente bajo el punto caliente de las Azores sea más húmedo que el del resto de la dorsal mesoatlántica? Desde luego. Años atrás, el grupo de Jean-Guy E. Schilling publicó que los basaltos del segmento del punto caliente situado entre 35 y 45 grados de latitud norte contienen de tres a cuatro veces más agua que los basaltos normales de la dorsal mesooceánica; presentan también concentraciones insólitamente elevadas de otros elementos volátiles, como cloro y bromo. Además, Schilling encontró que los basaltos del segmento de punto caliente de la dorsal abundaban en diversos elementos químicos (sobre todo tierras raras) mucho más que los basaltos normales de la dorsal mesooceánica. La concentración desacostumbrada, por alta, de esos elementos significa que el manto madre de la zona de punto caliente alberga una provisión enriquecida de ellos.

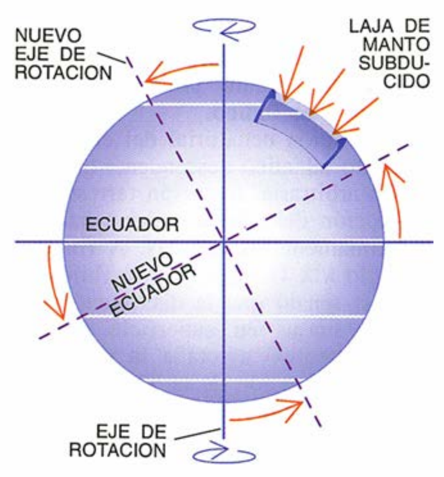
Parece, por consiguiente, que el manto situado por debajo del punto ca-



4. EXPLORACION DEL FONDO MARINO en la falla transformante Vema, situada en la región septentrional de la dorsal mesoatlántica. Nos servimos del *Nautile*. A lo largo de la pared meridional se encontró un afloramiento de peridotitas del manto en el talud inferior. Sobre ella había gabros, rocas creadas por el

liente de las Azores difiere del manto normal de la dorsal mesoatlántica, no tanto por hallarse más caliente cuanto por haber incorporado en algún estadio agua y otros fluidos que cambiaron su composición química y su comportamiento de fusión. Este metasomatismo, o transformación química de la peridotita del manto por fluidos, explicaría por qué el manto húmedo cerca de la superficie habría experimentado una fusión más intensa que un manto normal. También justificaría el que las temperaturas de equilibrio inferidas a partir de las peridotitas del punto caliente de las Azores no parezcan superiores a la media. Las reacciones de fusión consumen calor, de modo que tal vez la fusión parcial del manto ascendente haya enfriado el manto circundante. Cuanto mayor es el grado de fusión tanto mayor es la pérdida de calor.

¿De dónde procede el agua responsable del metasomatismo del manto? Una posible fuente sería el hundimiento de lajas de litosfera oceánica antigua en las zonas de subducción de los márgenes oceánicos, proceso que recicla agua en el manto. También podría liberarse agua en el manto superior durante procesos de desgasificación; a modo de ejemplo, el metano, un gas probable del manto profundo, podría oxidarse una vez que el magma ascendente alcanzara la región del manto superior. La reacción produciría agua (además de carbono, en forma de diamante o grafito).



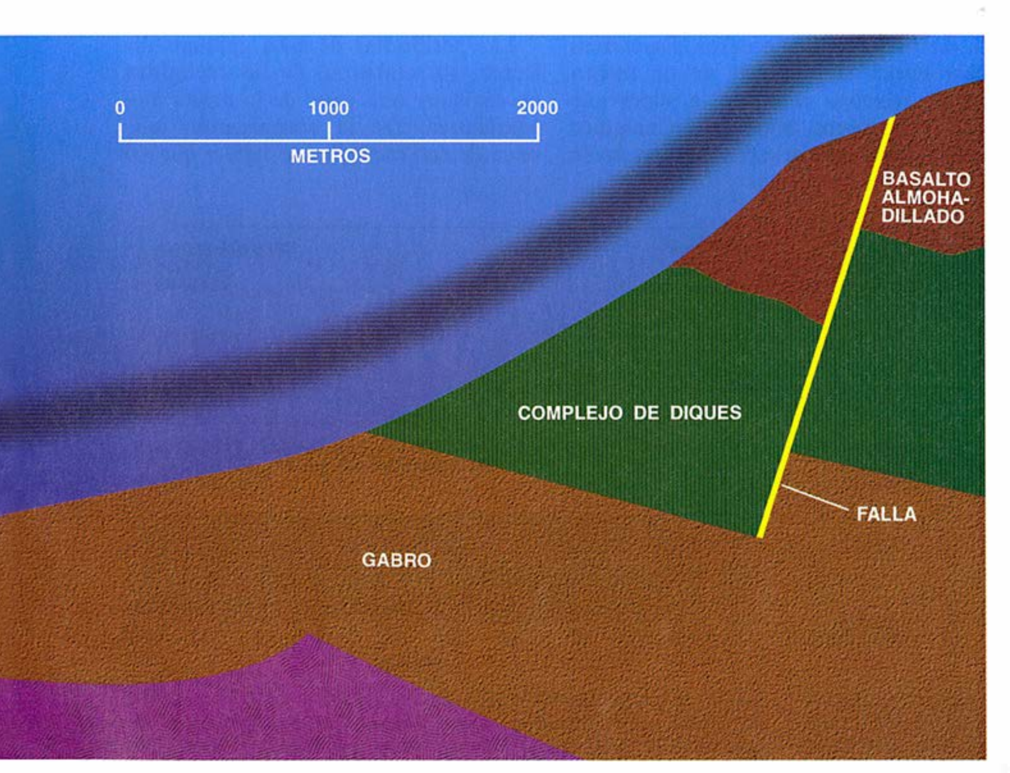
5. INCLINACION del eje de la Tierra; ese fenómeno podría estar condicionado por el hundimiento de lajas frías densas de manto. El hundimiento se produce en zonas de subducción, como las que rodean el Pacífico. El eje de rotación tendería a desplazarse de modo que el ecuador se acercara más a las lajas densas.

A tenor de la temperatura, inferior a la media, inferida para el manto subyacente bajo el punto caliente de las Azores, resulta evidente que este último no encaja en la definición habitual. ¿Cómo distinguir los diferentes tipos de puntos calientes (es decir, los realmente calientes de los que no lo son tanto) y deducir su origen? Quizás el gas helio nos ofrezca la respuesta. Este elemento puede formar dos isótopos estables, el helio 3 y el helio 4. Por desintegración radiactiva del uranio y el torio, se forma continuamente helio 4 en la corteza terrestre. Suele aceptarse que el helio 3 procede de una fuga incompleta de los gases primordiales que se incorporaron en el interior planetario durante las primeras etapas de su historia. La proporción de helio 3 a helio 4 en la atmósfera terrestre y en el agua marina ronda el uno por millón.

Pero esa proporción difiere cuando hablamos de muestras de rocas de las dorsales. Los grupos dirigidos por Harmon Craig y Mark D. Kurz han demostrado que la razón de helio 3 a helio 4 de los basaltos de la dorsal mesooceánica multiplica por ocho la atmosférica. En ciertos puntos calientes (los de Hawai e Islandia) es incluso mayor, quizá hasta 30 veces superior a la atmosférica. La abundancia de helio 3 induce a pensar que, en esos lugares, están escapando gases antiguos. Por tanto, la existencia de zonas de puntos calientes con proporciones elevadas confirma la tesis según la cual representan lugares de ascenso de plumas calientes desde el interior profundo de la Tierra.

En algunos puntos calientes, las Azores entre ellos, los basaltos contienen una proporción de helio 3 a helio 4 inferior a la de los basaltos de la dorsal mesooceánica; el componente primordial de esos puntos calientes se perdió o diluyó. El punto caliente de las Azores tal vez constituya, pues, una anomalía de fusión del manto de origen relativamente superficial. Quizá no esté ligado a una pluma térmica generada en el manto profundo o en el límite núcleo-manto. Es posible que estos puntos calientes no sean tales y debamos considerarlos “puntos húmedos”, dado el papel clave que los fluidos parecen desempeñar en su formación.

De acuerdo con nuestra investigación sobre las peridotitas del manto de la dorsal mesoatlántica, algunas zonas donde las temperaturas del manto son más frías podrían representar las ramas de retorno del circuito de convección del manto; es decir, las regiones de descenso. Para comprender esta afirmación, consideremos el sur de la región de las Azores, la zona ecuatorial de la dorsal mesoatlántica. La composición mineral de las peridotitas recogidas en el Atlántico ecuatorial indica que experimentaron



enfriamiento lento de magma basáltico fundido (la parte fundida de la peridotita). El *Nautile* descubrió un complejo de diques, estructura formada cuando el magma basáltico se enfría y solidifica antes de alcanzar el fondo oceánico. Sobre este complejo había basalto almohadillado.

poca, si alguna, fusión, lo que implica una temperatura del manto excepcionalmente baja. Nadia Sushevskaya llegó a conclusiones similares en su estudio de los basaltos del Atlántico ecuatorial. Además, la corteza de la dorsal mesoatlántica ecuatorial se encuentra a una mayor profundidad bajo el geoide que la de latitudes mayores y las ondas sísmicas se propagan más deprisa en el manto superior subyacente bajo la dorsal mesoatlántica ecuatorial que en latitudes más elevadas. Ambas observaciones suponen un manto superior más denso y frío bajo la región ecuatorial del Atlántico, donde la temperatura puede cifrarse en 150 grados C por debajo de las reinantes en cualquier otra parte subyacente a la dorsal.

Una explicación plausible de la relativa frialdad y densidad del manto superior ecuatorial es que corresponda a las corrientes descendentes de manto. Es posible que las plumas ascendentes de los dominios septentrional y meridional del manto atlántico se encuentren en esta región, cedan su calor a sus aledaños más fríos y luego se hundan.

Klein, Jeffrey Weissel y Dennis E. Hayes, con sus respectivos colaboradores, descubrieron una situación afín en un tramo de dorsal mesooceánica que discurre entre Australia y la Antártida, una cadena montañosa excepcionalmente profunda; los basaltos recogidos en su cresta dan testimonio de haberse producido por una fusión extremadamente limitada en el manto. Sus hallazgos son coherentes con la hipótesis según la cual, entre Australia y la Antártida, coinciden y se hunden vastas corrientes de convección del manto procedentes del Pacífico y el Indico.

La posición ecuatorial del cinturón de manto atlántico descendente tal vez no sea arbitraria. Rotación terrestre y convección del manto podrían hallarse íntimamente vinculadas. A finales del siglo XIX George Darwin (hijo de Charles) señaló que la distribución de grandes masas en superficie (como los continentes) afecta a la posición del eje de rotación de la Tierra. Otros han investigado desde entonces el efecto de las inhomogeneidades del manto sobre la deriva polar (desplazamiento del manto con respecto al eje terrestre). La deriva resulta de la tendencia natural de un objeto que gira a reducir al mínimo la energía consumida en esa rotación.

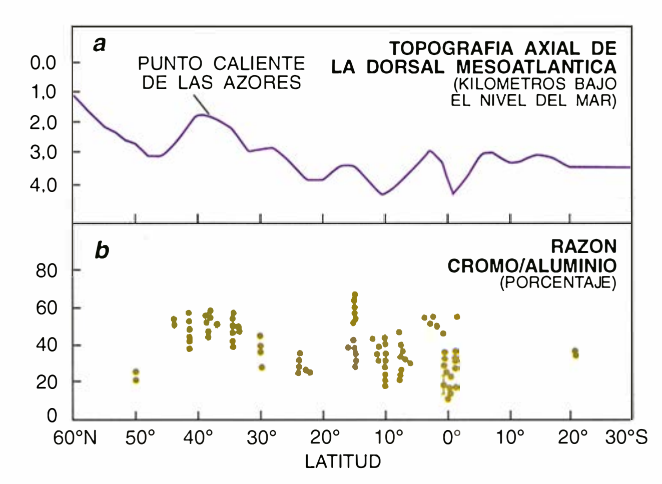
La redistribución de masas en el interior del planeta puede registrarse en el manto. H. William Menard y LeRoy M. Dorman sugirieron que la profundidad de las dorsales mesooceánicas depende, en general, de la latitud: aumenta hacia el ecuador y disminuye hacia los polos. Ciertas mediciones gravitatorias revelaron también un exceso de masa bajo las áreas ecuatoriales. Datos todos ellos que comportan la existencia de masas frías y densas en el manto superior ecuatorial.

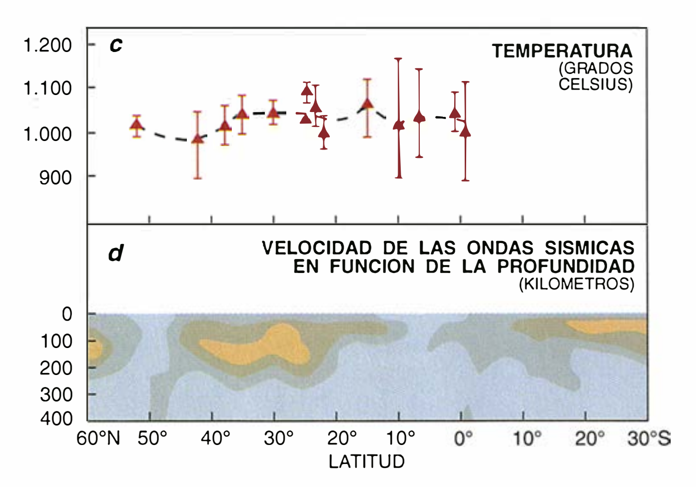
El hundimiento de lajas frías y densas en el manto parece influir en la deriva polar. Las pruebas disponibles corroboran la hipótesis de un manto menos viscoso cerca de la superficie que a mayores honduras. Cualquier masa densa que se abra camino hacia el manto, como las propias de zonas de subducción en los márgenes de algunos océanos, afectará a la posición del eje de rotación: el ecuador tenderá a desplazarse hacia las masas densas. Si en la cercanía del ecuador hay masas de gran densidad, es verosímil que en el manto superior ecuatorial predominen los puntos de hundimiento y de manto más frío. Este fenómeno explicaría, al menos cualitativamente, el cinturón de manto superior frío y la ausencia de fusión normal en la zona ecuatorial del Atlántico y, probablemente, del Pacífico.

Un borde de manto descendente justificaría la curiosa geología de la región ecuatorial. En 1835, durante su famoso viaje en el *Beagle*, Charles Darwin fondeó en isletas rocosas peladas que apenas emergían del mar. Las islas, hoy llamadas rocas de los santos Pedro y Pablo, están en el centro del Atlántico, a pocas millas del ecuador. Darwin describió la pugna entre colonias nidificantes de súlidos y grandes cangrejos rojos por cada parcela de espacio disponible en las rocas, lucha que persiste.

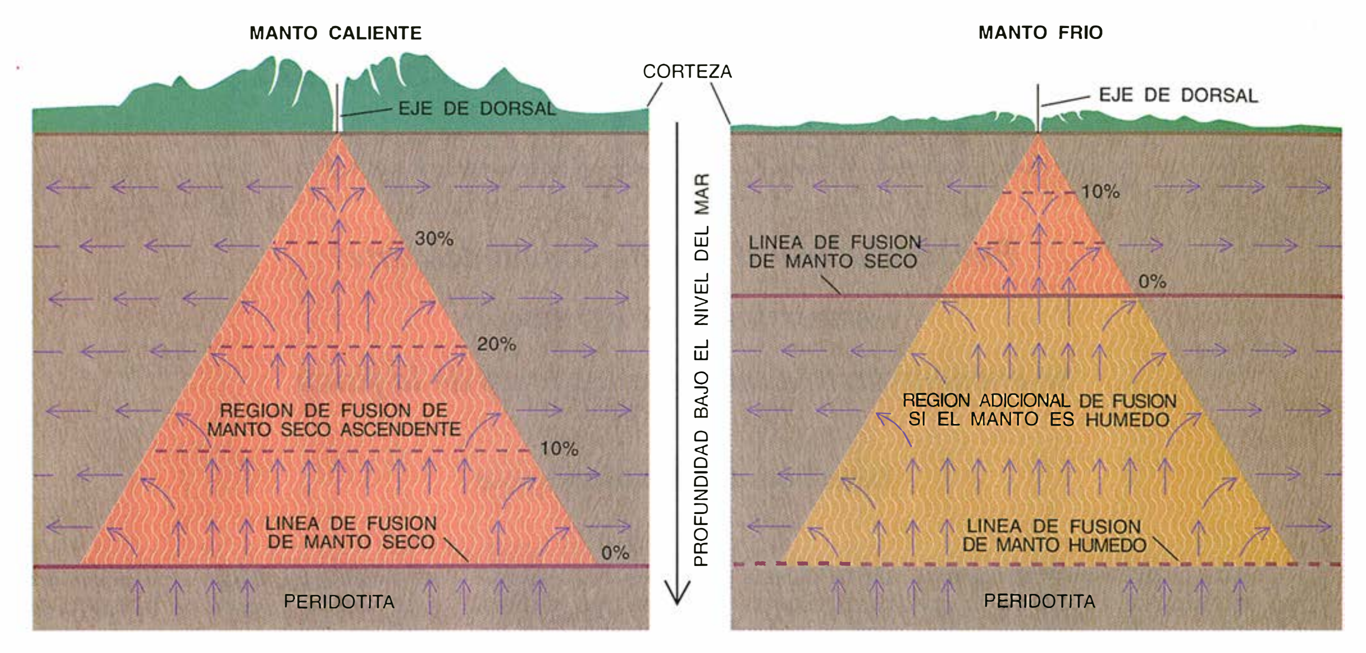
Advirtió la peculiaridad geológica de los islotes; a diferencia de la mayoría de las islas oceánicas no eran volcánicos. Observación confirmada hace muy poco por los equipos de William G. Melson y Mary K. Roden. Las rocas de los santos Pedro y Pablo son peridotitas y constituyen una elevación del manto superior.

Las peridotitas de esos peñones difieren, sin embargo, de las recogidas en cualquier otra parte de la dorsal mesoatlántica. De la composición química de sus minerales se infiere que no





6. PERFILES A LO LARGO DEL EJE de la dorsal mesoatlántica. Revelan la naturaleza insólita de la región de las Azores, donde el fondo marino adquiere un aspecto abovedado (*a*). Las mediciones de la razón entre cromo y aluminio en la espinela indican que éste se fundió principalmente aquí (*b*). Tales datos sugieren que la región de las Azores es un punto caliente, pero no concuerdan con los cálculos de temperatura: la región de las Azores parece estar ligeramente más fría (*c*). Puede que esta área haya experimentado mucha fusión porque el material del manto está húmedo, según reflejan las mediciones de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas que atraviesan el manto (*d*). La densidad de las zonas húmedas es inferior a los valores medios, y por tanto las ondas sísmicas se propagan con mayor lentitud (*amarillo*) a través de las mismas. En el área ecuatorial se observan velocidades sísmicas elevadas (*azul*), lo que induce a pensar en un material denso.



7. MANTO ASCENDENTE cuyo nivel de fusión depende de su temperatura (*izquierda*, caliente; *derecha*, fría). Los porcentajes indican la cantidad de peridotita que se funde. La fusión continúa hasta que la peridotita deja de subir y empieza a fluir horizontalmente. Cuanto más caliente está el manto, tanto mayor es la profundidad a la que empieza la fusión, y así se funde más manto y más gruesa es la corteza creada. Un manto frío se funde menos, salvo que contenga fluidos. En tal caso, empieza a fundirse a una profundidad mucho mayor e incluso en mayor cuantía que un manto caliente.

sufrieron fusión apenas, si es que experimentaron alguna. Los materiales se equilibraron en el manto a una temperatura baja. Se parecen a las peridotitas de los rifts continentales, o "preoceánicos" (como las que afloran en la isla de Zabargad en el mar Rojo), más que a las encontradas en las dorsales oceánicas. Presentan indicios de haber conocido en el manto un fuerte metasomatismo, mayor que el experimentado por las muestras de la dorsal mesoatlántica.

Diríase, por tanto, que en los santos Pedro y Pablo aflora un manto más propio de un rift continental que de una dorsal mesooceánica. En efecto, la investigación geoquímica realizada por el grupo de Roden induce a pensar que el metasomatismo que afectó al manto de estas islas tuvo lugar hace unos 150 millones de años, momento que marca la fase de rift que precedió a la separación de Africa y Sudamérica en el Atlántico ecuatorial (durante la fragmentación de Pangea).

¿Cómo pudieron emerger, en medio del Atlántico, bloques de manto de origen subcontinental? La respuesta pudiera yacer en la forma en que se rompió Pangea, con un manto superior frío y denso en la región ecuatorial.

Un manto ecuatorial más frío de lo normal cuando empezó a abrirse el Atlántico implicaría una litosfera continental más fría y gruesa a lo largo del cinturón ecuatorial. (Hace 100 millones de años, el ecuador atravesaba lo que luego serían las costas de Africa y Sudamérica, por donde, más o menos, lo hace hoy.) La litosfera ecuatorial, fría y gruesa, debió de oponer resistencia a la propagación del rift desde el sur; la región ecuatorial podría haberse comportado como una "zona bloqueada" (en el sentido que le da Vincent E. Courtillot). En razón de ello, el Atlántico ecuatorial se fue abriendo perezosamente, y esa lenta apertura pudo haber creado las grandes zonas de fractura ecuatoriales, que se nos revelan en las grietas que desencajan, de este a oeste, segmentos de dorsal mesooceánica.

Durante la apertura del Atlántico ecuatorial estas zonas de fractura estuvieron sujetas a intensos esfuerzos de compresión y a violentos movimientos verticales de bloques litosféricos. De lo que cabe inferir la probabilidad de una emergencia y hundimiento más o menos periódicos de bloques corticales en el océano. Algunos gajos de litosfera continental, sin embargo, se habrían quedado en medio del océano; por ejemplo, el correspondiente a los santos Pedro y Pablo. Del mismo modo que las regiones de manto caliente ascendente generan tipos característicos de islas volcánicas, las zonas frías descendentes producen también la emersión de un tipo diferente de islas.

Vale la pena preguntarse en qué medida pudieron el ascenso y el descenso de tales islas haber influido en la vida sobre el planeta. Fijémonos en el comportamiento migratorio de la tortuga verde marina (*Chelonia mydas*), reptil que vive en la costa brasileña y realiza un arduo viaje de 2000 kilómetros para desovar en la isla Ascensión. Este curioso comportamiento hunde quizá sus raíces en el de sus antepasados, que medraron hace 80 millones de años, con un Atlántico ecuatorial angosto. Podemos suponer que las tortugas ancestrales utilizarían islas próximas a la costa brasileña para desovar y, con la dilatación el Atlántico y hundimiento de algunas islas, sus descendientes se verían obligadas a alargar su travesía centenares de kilómetros.

Ya que mandar sumergibles al fondo oceánico no siempre resulta factible, habrá que perfeccionar otras técnicas, como la tomografía sísmica, para distinguir los puntos húmedos de los calientes. Sigue en el alero la cuestión del origen de la convección del manto y su extensión hasta el manto profundo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NOT SO HOT "HOT SPOTS" IN THE OCEANIC MANTLE. E. Bonatti en *Science*, vol. 250, páginas 107-111; 5 de octubre de 1990.

RIDGES, HOTSPOTS AND THEIR INTERACTION AS OBSERVED IN SEISMIC VELOCITY MAPS. Y. S. Zhang y T. Tanimoto en *Nature*, volumen 355, n.º 6355, páginas 45-49; 2 de enero de 1992.

A COLD SUBOCEANIC MANTLE BELT AT THE EARTH'S EQUATOR. E. Bonatti, M. Seyler y N. Sushevskaya en *Science*, vol. 261, páginas 315-320; 16 de julio de 1993.

Física cuántica de los viajes a través del tiempo

Por mucho que el sentido común descarte excursiones de ese tipo, se encuentran avaladas por las leyes de la física

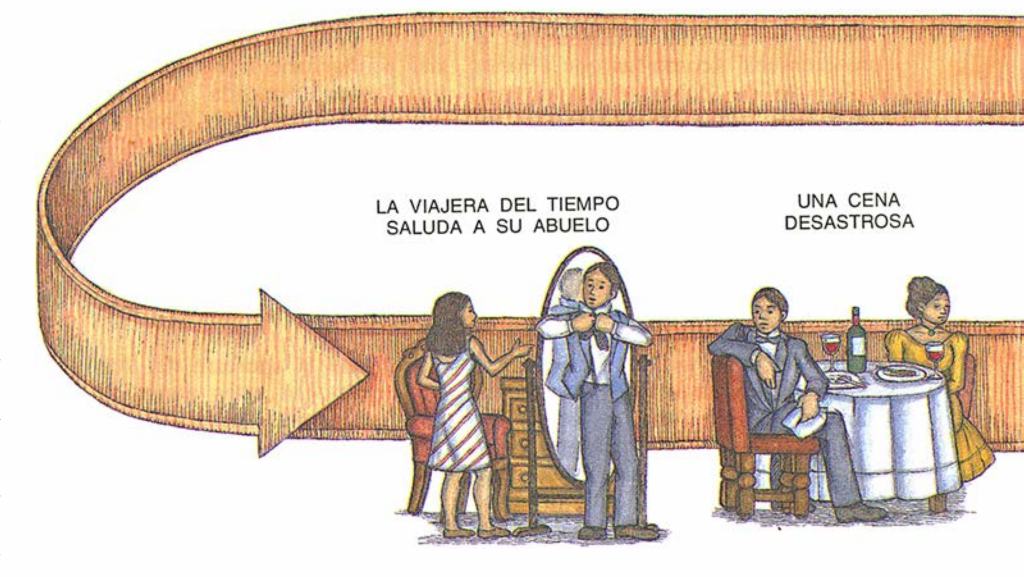
David Deutsch y Michael Lockwood

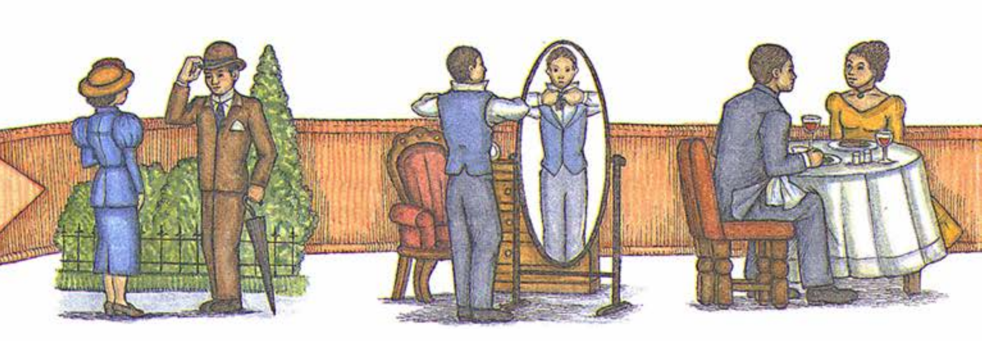
Nuestra amiga Sonia guarda una máquina del tiempo en su garaje. Anoche marchó con ella. Se remontó hasta el año 1934, y visitó a su abuelo, que por entonces andaba rondando a su abuela. Sonia le convenció de que era, o sería, su nieta contándole secretos de familia que él no le había descubierto aún a nadie. El hombre se quedó de piedra, pero lo peor vino después, cuando éste comentó a su pretendida, en la cena, que acababa de conocer a la nieta de ambos. A ella le pareció que no debía de estar en sus cabales, y le ofendió que diera por hecha su conquista. No se casaron, y nunca tuvieron la hija que habría sido la madre de Sonia.

Pero entonces, ¿cómo es posible que Sonia esté ahí sentada, contándonos su aventura? Si su madre no nació, ¿cómo pudo nacer ella? Lo que en realidad hay que preguntarse es: cuando Sonia retrocede a 1934, ¿puede abortar el flirteo de los abuelos o no? Se responda lo que se responda, habrá problemas. Si Sonia puede impedir su propio nacimiento, se da una contradicción. Si no, su incapacidad va contra el sentido común, pues ¿qué le obstaría hacer lo que quisiera? ¿Sufriría una extraña parálisis cada vez que intentase llevar a cabo ciertos propósitos?

Se suele creer que situaciones de semejante tenor —versión incruenta de la clásica "paradoja del abuelo", donde éste es asesinado por su nieto, que ha remontado el tiempo para hacerlo— descartan que pueda haber viajes por el tiempo. Mas, por sorprendente que parezca, las leyes de la física no imponen prohibición alguna al respecto.

Otra paradoja bastante extendida es la analizada por Michael Dummett, de Oxford. Un crítico de arte viene del futuro para visitar a un pintor del siglo veinte, a quien en la época de aquél se tiene por artista reputado. Pero observa que la obra realizada hasta estas alturas del XX es mediocre y deduce que aún están por pintar los inspirados cuadros que impresionarán a las generaciones venideras. Le enseña un libro donde están reproducidos. El pintor se las apaña para guardárselo, y el crítico ha de





1. LA PARADOJA DEL ABUELO —que una viajera del tiempo impida su propio nacimiento— es una objeción habitual contra los viajes a través del tiempo.

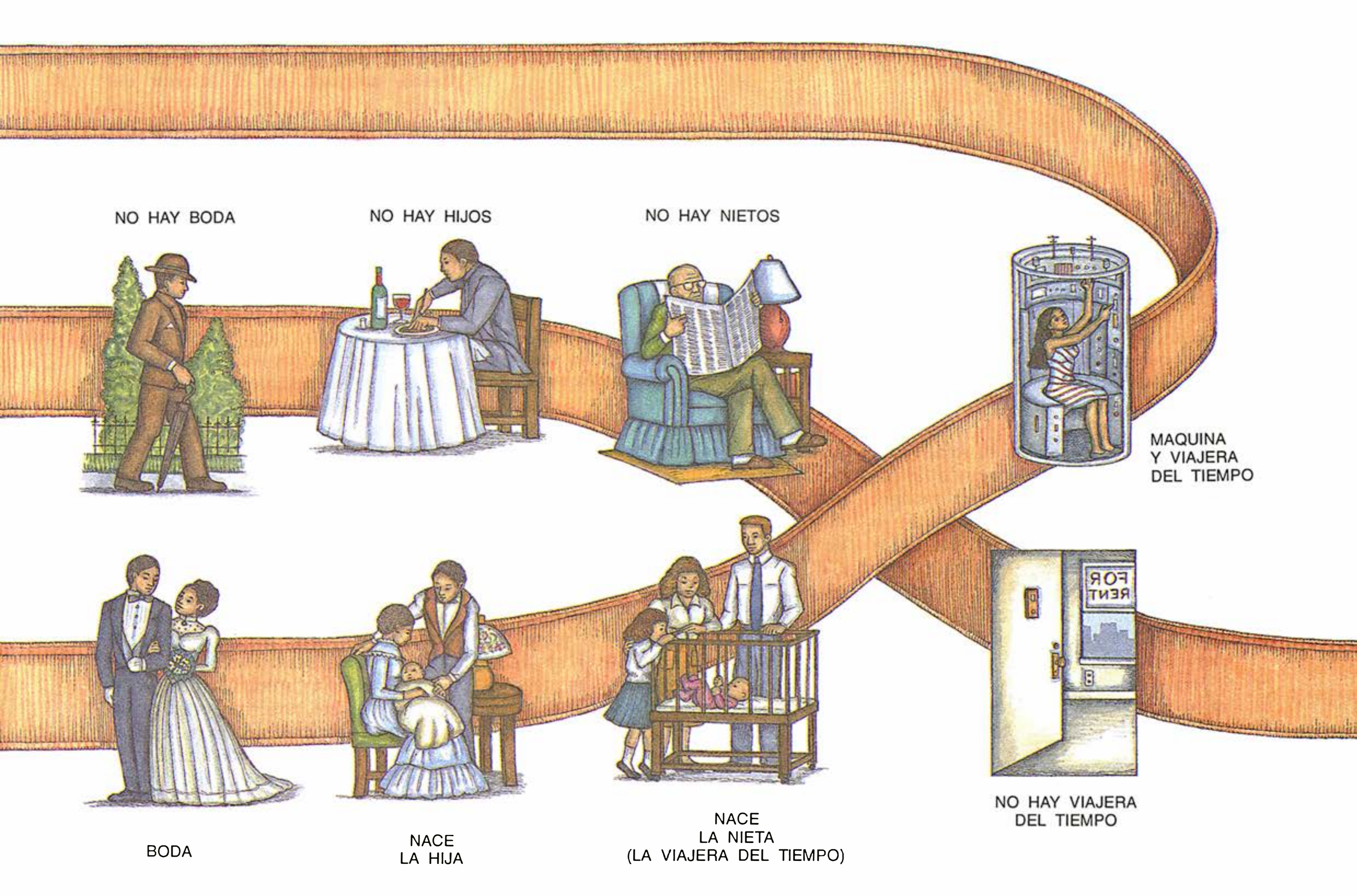
partir sin él. Aquél se dedica entonces a copiar en lienzo, con la fidelidad más escrupulosa, las reproducciones. Y así: las reproducciones existen porque han sido sacadas de los cuadros, y los cuadros existen porque han sido sacados de las reproducciones. No hay detrás del relato contradicción alguna, pero sí un profundo error; se nos pide, en efecto, que creamos que puede haber pinturas sin que alguien se empeñara en crearlas, como si en las artes hubiera "barra libre".

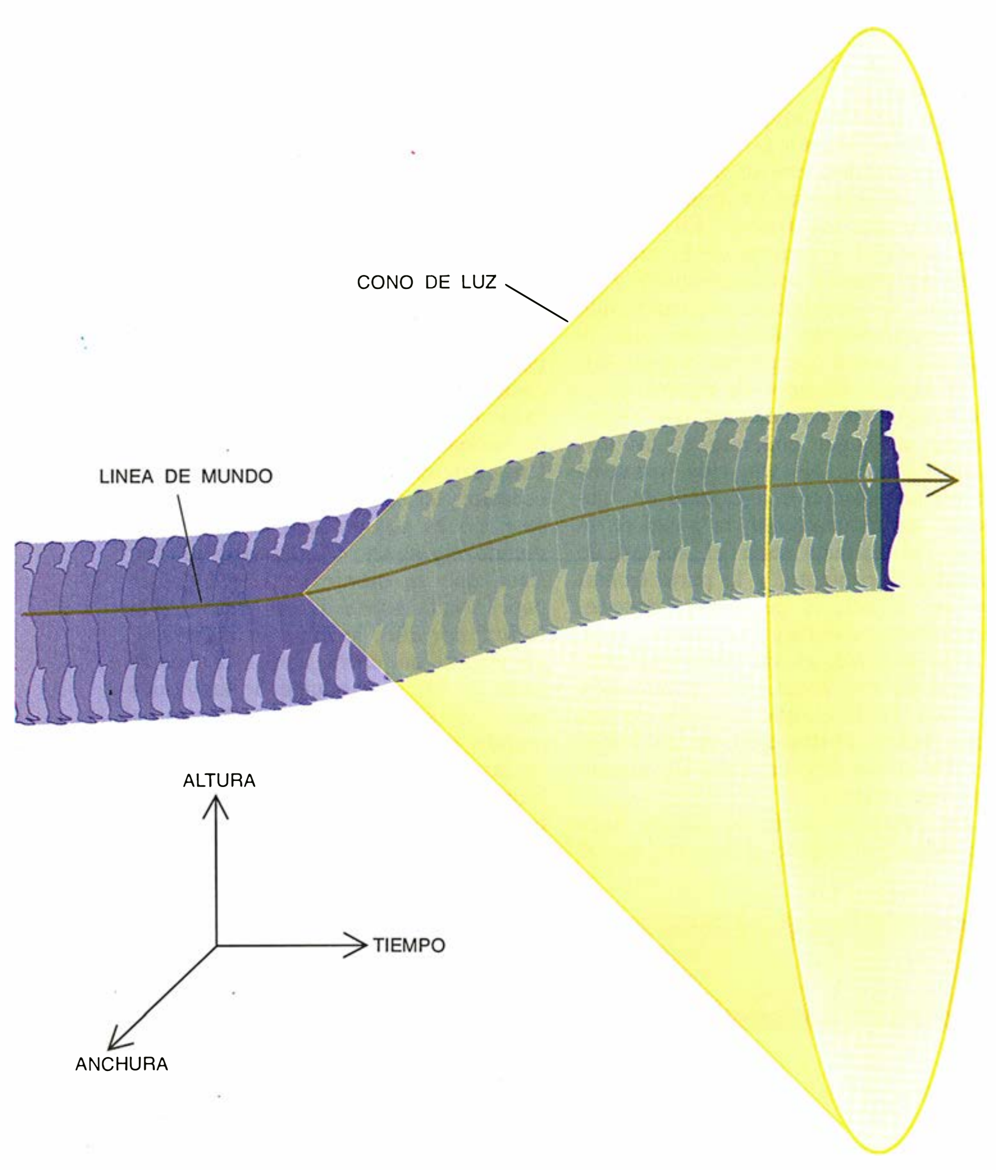
Estas objeciones han convencido a los físicos, quienes han venido formulando un principio cronológico que, por *fiat*, prohíbe los viajes a través del tiempo. El viaje unidireccional hacia el futuro no plantea problemas de esa índole. La teoría especial de la relatividad predice que, con aceleración suficiente, unos astronautas podrían abandonar la Tierra y regresar pasados unos decenios, sin que hubiesen envejecido más que un año o dos. Hay que distinguir las predicciones de este tipo, que se limitan a provocar nuestra perplejidad, de los procesos que violen las leyes físicas o contradigan principios filosóficos que tengan una justificación autónoma.

¿Por qué los viajes al pasado no contradirían ningún principio de ésos? Para responder, empecemos por considerar el concepto de tiempo según lo entienden los físicos. En las teorías especial y general de la relatividad, el espacio tridimensional y el tiempo se combinan constituyendo un espacio-tiempo tetradimensional. El espacio consta de puntos espaciales, y el espacio-tiempo, de puntos espacio-temporales, o sucesos, que representan un lugar concreto en un instante concreto. Nuestra vida forma en el espacio-tiempo una especie de "gusano" tetradimensional: la punta de la cola del gusano sería el suceso de nuestro nacimiento, y la parte frontal de su cabeza, el de nuestra muerte. Un objeto —nuestro cuerpo—, visto en un instante, es un corte tridimensional de ese largo, fino y retorcido gusano. La línea que describe un objeto, hecha abstracción de su bulto, recibe el nombre de línea de mundo (de ese objeto).

En cualquier punto de nuestra línea de mundo, el ángulo que forme con el eje temporal medirá nuestra velocidad. La línea de mundo de un rayo de luz tiene una inclinación de 45 grados; un destello de luz que se propague en todas las direcciones dibujará en el espacio-tiempo un cono, el "cono de luz". Una diferencia importante entre el espacio y el espacio-tiempo es que, en éste, no es posible que una línea de mundo zigzaguee, a diferencia de una línea que se dibuje en una hoja de papel. Nada puede ir más deprisa que la luz; por ello, la línea de mundo de un objeto no caerá nunca fuera del cono de luz que emane de cualquier punto de su pasado. A las líneas de mundo que satisfacen esta condición se las llama de "tipo tiempo". A lo largo de ellas, el tiempo, tal y como lo mide un reloj, crece en una de las dos direcciones posibles.

DAVID DEUTSCH y MICHAEL LOCKWOOD, ambos de la Universidad de Oxford, sienten el mismo interés por la fundamentación de la física. Deutsch se doctoró bajo la dirección de Dennis Sciama, continuando su formación con John A. Wheeler, Bryce de Witt y Roger Penrose. Lockwood enseña en el departamento de formación permanente.





2. ESPACIO Y TIEMPO se combinan y forman una entidad tetradimensional: el espacio-tiempo. En el gráfico se representan dos dimensiones espaciales y el tiempo. Una línea de mundo conecta en el espacio-tiempo todos los sucesos de nuestra vida. Las líneas de mundo de los rayos de luz que emanen de un punto, en todas las direcciones, describen un cono en el espacio-tiempo, el "cono de luz". Sea cual sea el objeto, su línea de mundo —la de un ombligo, por ejemplo— no saldrá nunca de los conos de luz que parten de cualquier punto de su pasado.

La teoría especial de la relatividad exige que las líneas de mundo de los objetos físicos sean de tipo tiempo; según las ecuaciones de campo de la teoría general de la relatividad, los objetos de gran masa (estrellas y agujeros negros) deforman el espacio-tiempo y doblan las líneas de mundo. Ese es el origen del fenómeno de la gravitación: la línea de mundo de la Tierra describe una espiral alrededor de la del Sol, y ésta hace lo propio en torno a la línea de mundo del centro de la galaxia.

Supongamos que el espacio-tiempo se deforma hasta el extremo de que se produzcan bucles cerrados. Tales líneas de mundo pueden ser de tipo tiempo a lo largo de todo su recorrido. Localmente, exhibirían todas las propiedades espacio-temporales que nos son familiares; y serían pasillos hacia el pasado. Si siguiéramos una curva de tipo tiempo cerrada (en adelante, CTC) sin separarnos nunca de ella, nos precipitaríamos sobre nuestros anteriores yoes, y éstos nos sustituirían. Pero si recorriésemos sólo parte de una CTC, podríamos volver al pasado. Podríamos estrecharle la mano a nuestro propio yo más joven o, si el bucle fuese de longitud suficiente, visitar a nuestros antepasados.

Para ello, tendríamos que domeñar CTC naturales o crear otras curvas de tipo tiempo cerradas deformando y rasgando la fábrica del espacio-tiempo. Una máquina del tiempo nos daría una ruta al pasado por la que nos desplazaríamos con una nave espacial, por ejemplo. Pero, a diferencia de lo que acontece con un camino tridimensional, una CTC, o más bien el tubo de tipo tiempo cerrado que la rodease, se iría colmando con cada recorrido que se hiciese; y así cuantos gusanos de línea de mundo se ajustaran a ella, pero ninguno más. Quien viaje a un suceso concreto se encontrará allí con cualquiera que haya viajado, o viaje jamás, hasta él.

¿Hay ahora, o habrá alguna vez, CTC en nuestro universo? Lo ignoramos. Se han esgrimido, sin embargo, varias hipótesis sobre su origen posible. Kurt Gödel halló una solución de las ecuaciones de Einstein que describe las CTC. En ella, el universo entero gira; pero, conforme a lo que hasta ahora se ha observado, el universo real no lo hace. Las CTC aparecen también en las soluciones de las ecuaciones de Einstein que describen la geometría generada por un agujero negro en rotación. Pero estas soluciones no tienen en cuenta la materia que vaya cayendo en él, así que no está muy claro hasta qué punto son aplicables a un verdadero agujero negro. Además, una viajera del tiempo quedaría, una vez hubiese llegado al pasado, atrapada en el interior del agujero, a no ser que su velocidad de giro sobrepasase cierto valor crítico. Es muy improbable, opinan los astrofísicos, que haya algún objeto de ese tipo que gire tan deprisa. Puede que una civilización mucho más avanzada que la nuestra estuviese en condiciones de inyectar materia a los agujeros negros de forma que su velocidad de rotación aumentara hasta el punto de que surgiesen CTC seguras, pero muchos dudan de la posibilidad de semejante hazaña.

John A. Wheeler dio el nombre de agujeros de gusano a una suerte de atajos a través del espacio-tiempo. Kip S. Thorne ha mostrado el movimiento de los cabos de un agujero de gusano hasta constituir una CTC. Según recientes cálculos de J. Richard Gott una cuerda cósmica (otro constructo teórico) que pase rápidamente por otra generaría estructuras CTC.

Mucho nos falta para descubrir alguna curva de ésas. Pero a lo mejor una civilización futura las tiene a su alcance y quiere poner en práctica las paradojas espacio-temporales. Examinemos, pues, éstas más de cerca, para ver si los viajes a través del tiempo violarían algún principio de la física clásica o de la cuántica.

La física clásica establece de manera taxativa que Sonia, una vez en

el pasado, tendría que hacer lo que la historia revele que hizo. Algunos objetan que ello supondría negarle "libre albedrío". Pero este argumento contra los viajes a través del tiempo carece de fuerza en el dominio de la física clásica. En efecto, de no haber CTC, la física clásica es determinista; lo que ocurra en un instante dado queda del todo determinado por lo que ocurrió en cualquier instante precedente (o por lo que ocurrirá en cualquier instante futuro). Por tanto, todo lo que hagamos será consecuencia inevitable de lo que pasara antes incluso de que fuéramos concebidos. Se suele aceptar que el determinismo es incompatible con el libre albedrío. Por tanto, los viajes por el tiempo no son para la libertad de decisión libre una amenaza mayor que la propia física clásica.

El verdadero meollo de la paradoja del abuelo no es la violación del libre albedrío, sino de cierto principio fundamental, implícito en el razonamiento científico y en el sentido común: lo llamamos el principio de autonomía. Dicta que es posible crear en nuestro más cercano entorno cualquier configuración material que las leyes de la física permitan localmente, ocurra lo que ocurra en el resto del universo. Cuando nos disponemos a encender una cerilla, no hemos de preocuparnos en absoluto de que los planetas estén o no ordenados de una manera incompatible con que la cerilla prendida. La autonomía es una propiedad lógica, y es muy deseable que las leyes físicas la posean. En ella descansa toda la ciencia experimental: damos por sentado que podemos instalar nuestros aparatos de cualquier forma que no esté prohibida por las leyes físicas; el resto del universo ya se ocupará de sí mismo.

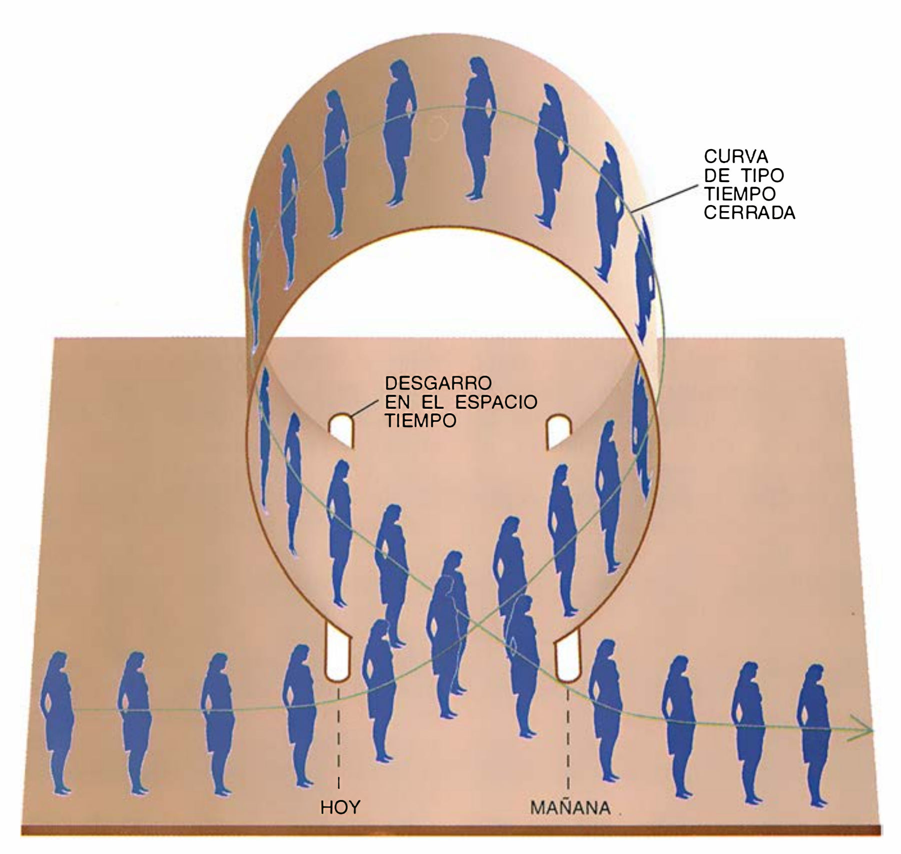
Si no hay curvas de tipo tiempo cerradas, la física clásica y la cuántica satisfacen el principio de autonomía. Pero si las hay, la física clásica lo contraviene por culpa de lo que John L. Friedman llama, con otros autores, el principio de coherencia. Afirma éste que las únicas configuraciones materiales que pueden darse localmente son las coherentes consigo mismas a escala global. Si rige tal principio, el mundo a extramuros del laboratorio condiciona físicamente lo que realicemos a intramuros, aun cuando todo lo que hagamos en él sea localmente coherente con las leyes de la física. De ordinario, no somos conscientes de esta limitación, pues los principios de autonomía y coherencia nunca entran en contradicción. Pero, en un marco clásico y en presencia de CTC, esa concordia se romperá.

La física clásica dice que no hay más que una historia, así que, por mucho que quiera hacer algo diferente de lo que la historia dicte, la coherencia obligará a Sonia a representar el papel que tiene escrito. Puede que visite a su abuelo, pero a lo mejor, cuando éste se lo cuente a su futura esposa, ella se quede muy preocupada por la salud de quien le explica algo de ese jaez; el abuelo se conmoverá al percibir esa inquietud, y se le declarará; ella aceptará. No es que esto pudiera suceder; es que, en un mundo regido por la física clásica, tendría que suceder una cosa por el estilo. No sólo no cambiaría Sonia el pasado, sino que pasaría a formar parte de él.

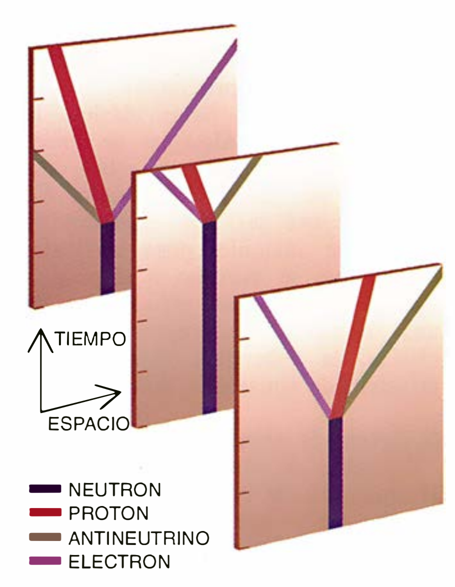
Pero, ¿y si Sonia se empeña en rebelarse contra la historia? Supongamos que retrocede en el tiempo en busca de sí misma. Esa Sonia más joven apunta lo que le dice la Sonia mayor, y cuando, con el paso del tiempo, le toca hacer el viaje al pasado, se propone decir algo distinto de lo señalado en el guión. ¿Hemos de suponer que se apodera de ella un impulso irresistible que le lleva a decir, en contra de su voluntad, las mismas palabras? Sonia podría incluso programar un robot que hablase por ella: ¿habría algo que le forzase a desobedecer el programa?

Conforme a la física clásica, la respuesta es sí. Algo ha de haber que impida a Sonia o al robot desviarse de lo que ya ha pasado. No tiene por qué ser algo espectacular. Basta con cualquier pega corriente: el vehículo se estropea o el programa contiene alguna pifia. Pero de una forma u otra, según la física clásica, la coherencia exige que el principio de autonomía falle.

Volvamos ahora a la historia del crítico de arte viajero del tiempo. Decimos de esa violación del sentido común que es una paradoja de conocimiento (la paradoja del abuelo es una paradoja de incoherencia). Empleamos aquí la palabra "conocimiento" en un sentido amplio, conforme al cual una pintura, un artículo científico, una pieza de maquinaria y un organismo vivo son formas de conocimiento. Las paradojas de este tipo van contra el principio de que el conocimiento sólo puede crearse a resultas de procesos de resolución de problemas, como la evolución biológica o el pensamiento humano. Da la impresión de que los viajes a través del tiempo dejan que el conocimiento fluya del



3. HABRA UNA CURVA DE TIPO TIEMPO CERRADA si se forma un bucle en el espacio-tiempo. Alguien que entrase mañana en la curva y se moviese por ella hacia delante en el tiempo podría acabar volviendo al día de hoy.



4. UN NEUTRON puede desintegrarse en cualquier momento, pero es más probable que lo haga en ciertos instantes que en otros. Para cada instante en que el neutrón pueda desintegrarse, hay un universo donde ello ocurre justo entonces, según la interpretación de Everett, o del "multiverso", de la mecánica cuántica.

futuro al pasado y de éste a aquél, en un bucle que se abastece a sí mismo, sin que alguien o algo haya tenido jamás que vérselas con los problemas inherentes a ese conocimiento. En este caso, la objeción filosófica no estriba en que se trasladen al pasado artefactos portadores de conocimiento, sino en la "barra libre" que la paradoja supone. El conocimiento que se necesita para inventar artefactos no deben suministrarlo éstos.

En una paradoja de incoherencia, los sucesos físicos padecen limitaciones más estrictas que las que estamos acostumbrados a encontrar. En una paradoja de conocimiento ocurre lo contrario. Por ejemplo, el estado del universo antes de que el crítico llegue no determina quién vendrá del futuro, ni qué traerá consigo: las leyes, por lo demás deterministas, de la física clásica permiten que el crítico se lleve al pasado unas copias excelentes, copias de poca calidad o que no lleve copia alguna. Esta indeterminación no constituye un impedimento fundamental para los viajes a través del tiempo. En realidad haría posible que se complementasen las leyes clásicas con un principio adicional que estableciese que el conocimiento sólo puede surgir como consecuencia de procesos de resolución de problemas.

Sin embargo, ese principio nos abocaría, en lo referente a la autonomía, a los mismos problemas con que tropezamos en la paradoja del abuelo. Pues, ¿qué le impediría a Sonia llevar nuevas creaciones o inventos al pasado y enseñárselos a sus antepasados? Por tanto, aunque la física clásica puede, al fin y al cabo, asimilar el tipo de viaje por el tiempo que se suele considerar paradójico, lo hace al precio de violar el principio de autonomía. No hay análisis clásico que elimine del todo la paradoja.

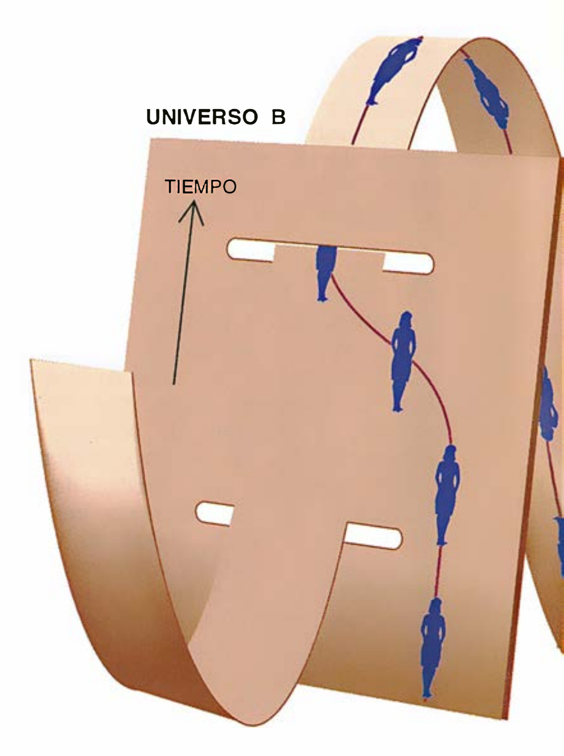
Todo esto, sin embargo, es meramente académico. No nos sirve la física clásica. En muchas ocasiones es una excelente aproximación de la verdad. Pero cuando median curvas de tipo tiempo cerradas, ni siquiera se acerca a ella.

De las CTC sabemos ya que, si existen, nos hará falta la mecánica cuántica para entenderlas. Stephen W. Hawking ha aducido que los efectos cuánticos, una de dos, o evitarían la formación de CTC o destruirían a cualquiera que, intentando convertirse en un viajero del tiempo, se acercase demasiado a ellas. Según los cálculos de Hawking, que emplea una aproximación en la que se dejan de lado los efectos gravitacionales de los campos cuánticos, las fluctuaciones de los campos tenderían al infinito cerca de una curva de tipo tiempo cerrada. No hay más remedio que recurrir a aproximaciones mientras no descubramos cómo se aplica la mecánica cuántica a la gravedad; pero los espacio-tiempos que contienen CTC llevan las técnicas actuales más allá de donde cabe fiarse de ellas. Creemos que los cálculos de Hawking sólo muestran las deficiencias de esas técnicas. Los efectos mecanocuánticos que describiremos no sólo no prohíben los viajes a través del tiempo, sino que en realidad los facilitan.

Puede que la mecánica cuántica necesite que haya CTC. Dar con ellas a escala macroscópica es muy difícil, pero es posible que los niveles submicroscópicos, donde los efectos cuánticos predominan, estén llenos de esas curvas. No hay todavía una teoría de la gravedad cuántica que sea completamente satisfactoria. Pero según muchas de las versiones propuestas, el espacio-tiempo, que a gran escala nos parece liso, tiene una estructura submicroscópica espumosa, llena de agujeros de gusano y de CTC que se internan 10^{-42} segundos en el pasado. Por lo que sabemos, puede que, por doquier a nuestro entorno, haya partículas subatómicas viajando hacia atrás en el tiempo.

La mecánica cuántica resuelve las paradojas de los viajes a través del tiempo. Es nuestra teoría fundamental, y se aparta radicalmente de la visión clásica del mundo. No predice qué observaremos, sino cuáles son los posibles resultados de una observación y con qué probabilidades se dan. Si esperamos a que un neutrón se desintegre (en un protón, un electrón y un antineutrino), lo más probable es que tengamos que hacerlo durante unos veinte minutos. Pero a lo mejor eso ocurre inmediatamente, o a lo peor hemos de esperar indefinidamente. ¿De qué forma podemos entender esta aleatoriedad? ¿Difiere en algún rasgo la estructura interna de cada neutrón de la de los demás, y por eso se desintegra cada uno cuando lo hace? Esta idea, de apariencia atractiva, resulta incompatible con ciertas predicciones de la mecánica cuántica que han sido corroboradas experimentalmente.

Se ha intentado poner a salvo nuestras intuiciones clásicas modificando la mecánica cuántica. Ningún intento ha tenido éxito. Por tanto, nos tomamos la mecánica cuántica al pie de la letra y adoptamos una concepción de la realidad que refleje la estructura de la teoría. Cuando hablamos de mecánica cuántica, nos referimos a la interpretación de la misma que recibe el nombre de interpretación de los muchos mundos, propuesta por Hugh Everett III en 1957. Según Everett, si algo puede ocurrir físicamente, ocurre (en algún universo). La realidad física consiste en una colección de universos, o, como



5. SI SE CONCIBE LA REALIDAD como un multiverso, las paradojas de los viajes por el tiempo se resuelven. Sonia piensa

se dice a veces, un "multiverso". Cada universo del multiverso contiene su propia copia del neutrón cuya desintegración queremos observar. Para cada instante en que el neutrón podría desintegrarse, hay un universo donde el neutrón se desintegra precisamente entonces. Puesto que estamos viéndolo, también tiene que haber muchas copias de nosotros mismos, una en cada universo. Vemos que el neutrón se rompe en un universo a las diez y media, en otro a las diez y treinta y uno, y así sucesivamente. Con respecto al multiverso, la mecánica cuántica es determinista: predice la probabilidad subjetiva de cada resultado prescribiendo la proporción de universos en los que ese resultado se da.

La interpretación de la mecánica cuántica ofrecida por Everett es objeto todavía de debate entre los físicos. La mecánica cuántica se suele utilizar como una herramienta de cálculo que, dada una entrada —informaciones acerca de un proceso físico—, entrega la probabilidad de cada posible salida. No nos hace falta casi nunca interpretar las matemáticas que describen ese proceso. Pero hay dos ramas de la física —la cosmología cuántica y la teoría cuántica de la computación— donde no basta con eso. Estas ramas tienen por objeto de estudio el funcionamiento interno del sistema físico abordado. Entre quienes se dedican a una u otra, la interpretación de Everett prevalece.

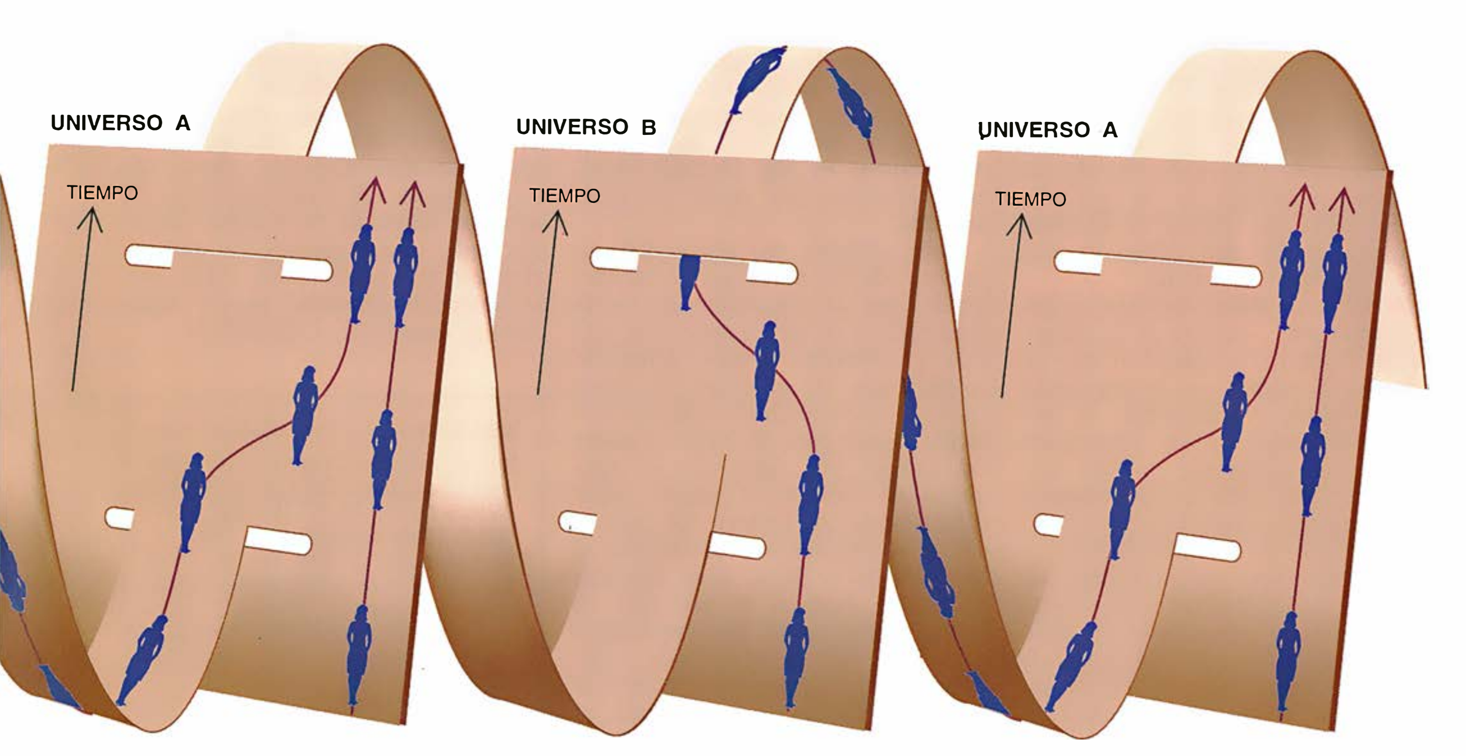
¿Qué dice la mecánica cuántica, a la luz de la interpretación de los muchos universos, sobre las paradojas de los viajes a través del tiempo? Para empezar, la paradoja del abuelo simplemente no se da. Supongamos que Sonia se embarca en un proyecto "paradójico" que, de llevarse a cabo, impediría que ella misma fuese engendrada. ¿Qué pasaría? Si el espaciotiempo clásico contiene CTC, entonces, según la mecánica cuántica, los universos del multiverso se enlazarán de manera insólita. En vez de haber muchos universos disjuntos, paralelos, cada uno con sus CTC, tendremos un único e intrincado espacio-tiempo, hecho de muchos universos conectados. El enlazamiento fuerza a Sonia a viajar a un universo que es idéntico, hasta el instante de su llegada, al que deja; pero, a partir de ese momento, difiere del abandonado por la escueta razón de que ella esté allí.

Pero, ¿impide Sonia su propio nacimiento o no? Depende de a qué universo nos refiramos. En el universo que abandona, el universo donde nació, su abuelo se casa con su abuela, pues en ese universo no visitó a su abuelo. En el otro universo, a cuyo pasado viaja, su abuelo no se casa con esa mujer en particular, y Sonia no nace.

Por tanto, que Sonia viaje por el tiempo no constriñe sus actos. Y, dicta la mecánica cuántica, nunca los constreñirá. La mecánica cuántica, aun en presencia de CTC, respeta el principio de autonomía.

Supongamos que Sonia se apresta a provocar una paradoja. Tiene pensado entrar mañana en la máquina del tiempo para salir de ella hoy; pero si una versión de sí misma sale de la máquina hoy, está decidida a no entrar mañana en la máquina. En la física clásica, esta resolución se contradice a sí misma; en la mecánica cuántica, no. En la mitad de los universos —llamémosles A—, una Sonia más vieja sale de la máquina del tiempo, y por tanto, en ellos, tal y como había decidido, la Sonia más joven no entrará mañana en la máquina del tiempo; cada universo A contendrá, a partir de ese momento, dos Sonias de edades un poco diferentes. En los otros universos —los universos B—, no sale nadie de la máquina del tiempo, así que Sonia parte y llega a un universo A donde se encuentra con una versión más joven de sí misma. De nuevo, puede comportarse en el pasado como quiera y apartarse de sus recuerdos, por otra parte exactos.

Así pues, en la mitad de los universos se produce el encuentro de las dos Sonias, y en la otra mitad no. En los universos A una Sonia más vieja sale "de ninguna parte", y en los universos B desaparece "en ninguna parte". Cada universo A contiene dos Sonias, la mayor de las cuales empezó su vida en un universo B.



entrar en la máquina del tiempo mañana y viajar, hacia atrás en el tiempo, a hoy, pero está decidida a no hacerlo si, hoy, ella misma sale de la máquina. Puede llevar a cabo este plan sin que se dé paradoja alguna. En el universo B no sale hoy de la máquina, así que mañana entrará en ella; entonces, saldrá de ella hoy, en un universo A, donde se encontrará con su copia, que no viajará.

Sonia ha desaparecido de cada universo B y emigrado a un universo A.

Por enrevesados que sean los planes de Sonia, la mecánica cuántica dice que los universos se encadenarán de manera que pueda llevarlos a cabo sin caer en contradicciones. Supongamos que Sonia intenta provocar una paradoja viajando alrededor de la conexión dos veces. Quiere reaparecer en el universo de donde partió y reunirse con su yo anterior para cenar fideos en vez de la ensalada que recuerda haber cenado. Puede hacer lo que quiera, y en particular, comer lo que desee en compañía de sí misma más joven; sin embargo, el multiverso, articulado de una manera diferente de como lo estaba en la anterior paradoja, le impide hacerlo en su universo original. Sonia sólo logrará comer fideos consigo misma en otro universo; en su universo original, seguirá sola y cenando ensalada.

Los viajes a través del tiempo harían que fuese posible otro curioso fenómeno, al que le damos el nombre de "separación asimétrica". Supongamos que el amigo de Sonia, Esteban, se queda atrás cuando ella se monta en la máquina del tiempo de alguna de las maneras que hemos descrito. En la mitad de los universos, Sonia entrará en la máquina para no retornar nunca. Desde el punto de vista de Esteban, pues, existe la posibilidad de quedar separado de Sonia. La mitad de las versiones de él la verán partir para no volver nunca (la otra mitad tendrá la compañía de una segunda Sonia). Pero desde el punto de vista de Sonia, no hay posibilidad alguna de que se produzca la separación, pues cada una de sus versiones terminará en un universo donde habrá una versión de Esteban, a quien tendrá que compartir con otra versión de sí misma.

Si Sonia y Esteban llevasen a cabo el mismo plan —entrar en la máquina del tiempo si y sólo si el otro no sale de ella primero —, se separarían por completo, y terminarían en universos distintos. Si sus intenciones fueran más complejas, podrían acabar tanto ella como él en compañía de un número cualquiera de versiones del otro. Si se pudieran hacer a gran escala viajes por el tiempo, civilizaciones galácticas enfrentadas usarían quizás estos efectos de separación asimétrica para conquistar la galaxia. Además, una civilización entera podría "clonarse" a sí misma las veces que quisiera, tal y como hacía Sonia consigo misma. Cuanto más a menudo realizase esa operación, tanto más probable sería que un observador la viera desaparecer de su universo, de la misma manera que Esteban veía desaparecer a Sonia del universo A mientras su "clon" aparecía en el universo B.

Por lo que se refiere a la historia del crítico de arte, la mecánica cuántica permite que, desde el punto de vista de sus personajes, todo suceda como Dummett cuenta. El universo de donde procede el crítico tiene que ser un mundo en que el artista acabó por pintar bien de verdad; allí, sus cuadros se produjeron gracias a un esfuerzo creativo, y las reproducciones fueron llevadas más tarde al pasado de otro universo. En éste hubo plagio, si se le puede llamar plagio a la copia de las obras de otra versión de uno mismo, y el pintor obtuvo "duros a peseta". Pero no hay paradoja alguna; los cuadros, ahora, se deben a un verdadero esfuerzo creativo, si bien en otro universo.

La idea de que las paradojas de los viajes a través del tiempo se resuelven con "universos paralelos", se encontraba ya en la literatura de ficción y en las reflexiones de algunos filósofos. Aquí no hemos expuesto tanto una nueva solución como una nueva forma de llegar a una solución ya conocida, deduciéndola de la física teórica vigente. Todas las afirmaciones enunciadas sobre el viaje a través del tiempo se siguen del uso de la mecánica cuántica para calcular el comportamiento de circuitos lógicos idénticos a los que se emplean en los ordenadores, si no fuera porque en ellos la información puede circular hacia el pasado por CTC. En estos modelos computacionales, los viajeros del tiempo son paquetes de información. Se han obtenido resultados similares por medio de otros modelos.

Estos cálculos nos libran definitivamente de las paradojas de incoherencia, que se convierten en meras excrecencias de una cosmovisión clásica y obsoleta. Hemos defendido también que las paradojas de conocimiento no supondrían tampoco obstáculo alguno para los viajes a través del tiempo. Mas, para que el argumento no ofrezca el menor punto débil, habría que traducir los conceptos de conocimiento y creatividad al lenguaje de la física. Sólo entonces podríamos decir si el principio de "no hay barra libre" que imponemos —es decir, que la creación de conocimiento requiera procesos de resolución de problemas— es coherente, en presencia de CTC, con la física cuántica y el resto de la física.

Hay una argumento contundente que se suele esgrimir contra los viajes a través del tiempo. En palabras de Hawking, "no existe mejor prueba contra tales viajes que el que no nos invadan hordas de turistas del futuro". Pero ahí se esconde gato encerrado. Pues una CTC llega hacia atrás en el tiempo sólo hasta el momento en que se creó. Si la primera curva de tipo tiempo cerrada, navegable, de la Tierra se construye en el 2054, los viajeros del tiempo que, a partir de esa fecha, la usen no podrán viajar más que al 2054 o después, nunca antes. Puede que ya haya CTC navegables en alguna parte de la galaxia. Pero ni siquiera en ese caso deberíamos esperar que nos invadiesen "hordas de turistas del futuro". Dada la limitada capacidad de las CTC y que en este universo no se puede reponer en cualquier momento el filón de curvas, las CTC son un recurso no renovable. Las civilizaciones extraterrestres o nuestros descendientes tendrán sus propias prioridades a la hora de usarlas, y no hay razón para suponer que visitar la Tierra en el siglo veinte esté entre las que más les urjan. Y aunque así fuese, sólo llegarían a ciertos universos, de los cuales, cabe presumir, éste no es uno.

Nuestra conclusión es que, si los viajes a través del tiempo son imposibles, la razón está aún por descubrir. A lo mejor encontramos o creamos algún día CTC navegables, o a lo mejor no. Pero si la interpretación de los muchos universos, o algo por el estilo, es verdad —y en la cosmología cuántica y en la teoría cuántica de la computación no se conoce otra posibilidad que sea viable—, entonces todas las objeciones aducidas contra los viajes a través del tiempo dependen de modelos falsos de la realidad física. Por tanto, toca a quienes aún quieran rechazar que pueda haber viajes por el tiempo el presentar nuevos argumentos científicos o filosóficos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUANTUM MECHANICS NEAR CLOSED TIMELIKE LINES. David Deutsch, en *Physical Review D*, vol. 44, n.º 10, págs. 3197-3217; 15 de noviembre de 1991.

THE PARADOXES OF TIME TRAVEL. David Lewis, en *American Philosophical Quarterly*, volumen 13, número 2, páginas 145-152; abril de 1976. Reimpreso en *The Philosophy of Time*. Oxford University Press, 1993.

MUST TIME MACHINE CONSTRUCTION VIOLATE THE WEAK ENERGY CONDITION? Amos Ori, en *Physical Review Letters*, volunen 71, n.º 16, págs. 2517-2520; 18 de octubre de 1993.

Estrategias parasitarias de los protozoos intracelulares

El estudio de los mecanismos que emplean los protozoos patógenos para penetrar y sobrevivir en el interior de las células parasitadas nos abre un mundo de adaptaciones biológicas

Wanderley de Souza

Entre las primeras células que pasaron por el porta de un microscopio óptico se cuentan los protozoos, un mundo abigarrado de unas 40.000 especies. Pero sólo un grupo restringido de ellas es capaz de causar grandes problemas. Se trata de los agentes parasitarios. En cuanto tales, interactúan con las células hospedantes.

Dos son las formas principales de esa relación. En una primera situación, los protozoos permanecen asociados a la superficie de la célula huésped impidiendo el funcionamiento normal de la misma. Así acontece en los casos de la giardiasis y la amebiasis, dolencias que afectan hoy a cerca de cien millones de personas y son causadas, respectivamente, por *Giardia duodenalis* y *Entamoeba histolytica*. Cuando se rompe el equilibrio que se establece entre parásito y huésped, por culpa de la naturaleza de determinada población del parásito o por fallo del sistema inmunitario del huésped, el protozoo atraviesa la barrera epitelial e invade las partes internas del organismo; ocurre así en la amebiasis de México.

En una segunda situación, los protozoos, al trabar contacto con la superficie de la célula huésped, recurren a mecanismos que culminan con la penetración en el interior de ésta, donde pueden sobrevivir largo tiempo. A este grupo pertenecen los protozoos intracelulares.

Los protozoos intracelulares causan algunas enfermedades de extrema gravedad. Citemos varias: el paludismo, que sufren unos 270 millones de personas de Asia, Africa e Iberoamérica y provoca la muerte anual de casi un millón de individuos; la enfermedad de Chagas, que padecen unos 18 millones de personas en Iberoamérica; las leishmaniosis, con casi 12 millones de afectados en Iberoamérica, Asia, Africa y Europa, y la toxoplasmosis, que afecta a un 20 % de la población mundial, constituyendo una peligrosa complicación para los individuos con alteraciones del sistema inmunitario, sea por infección vírica en los sidosos sea por quimioterapia inmunosupresora.

Desde el punto de vista evolutivo, importa resaltar que, al desarrollar su capacidad de penetrar en el interior de la célula huésped, los protozoos quedan menos expuestos a la acción de los procesos inmunitarios y quimioterapéuticos que se emplean para combatir las infecciones. En la respuesta inmunitaria desencadenada por factores proteicos (anticuerpos y componentes del sistema del complemento), éstos se ligan a la superficie del protozoo y pueden provocar su lisis directa o facilitar su captación, con destrucción subsiguiente, por parte de células especializadas; los agentes quimioterapéuticos actúan preferentemente sobre los parásitos. En ambos casos, la presencia del protozoo en el interior de la célula impone una barrera que puede dificultar, si no impedir, la interacción entre sustancias exógenas o endógenas y el parásito, lo que explica cuán duro resulta controlar las enfermedades infecciosas causadas por agentes biológicos intracelulares (virus, bacterias y protozoos).

De entre los protozoos dotados de capacidad para penetrar en las células de los vertebrados podemos distinguir dos grupos. Comprende el primero aquellos protozoos que son altamente selectivos con respecto a la futura célula huésped; así, el género *Plasmodium* (responsable del paludismo), el género *Babesia*, que infecta las células del linaje eritrocitario, el género *Theileria* (agente de una fiebre peculiar de los vaqueros), que daña a los linfocitos, y el género *Leishmania* (causante de varias formas clínicas de leishmaniosis), que ataca a los macrófagos.

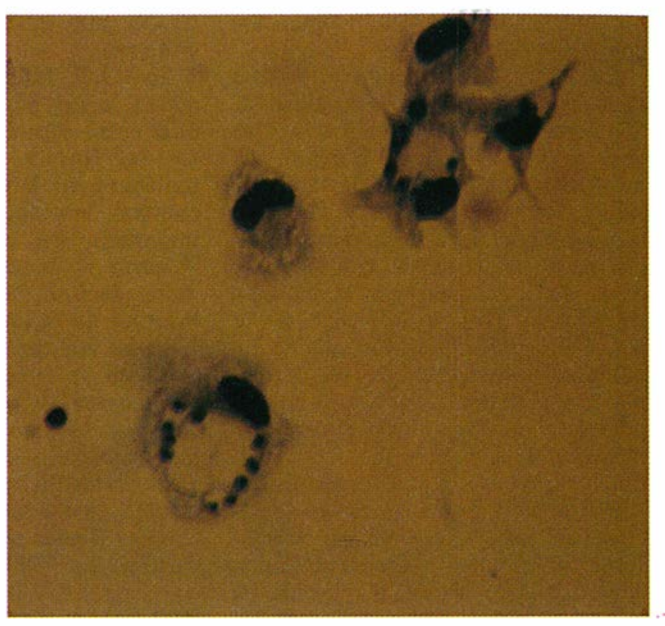
En el segundo grupo se incluyen los protozoos que, aunque especializados en determinado tipo celular, infectan casi cualquier célula eucariota donde se hospeden. Merecen citarse *Trypanosoma cruzi* (agente de la enfermedad de Chagas) y *Toxoplasma gondii* (culpable de la toxoplasmosis).

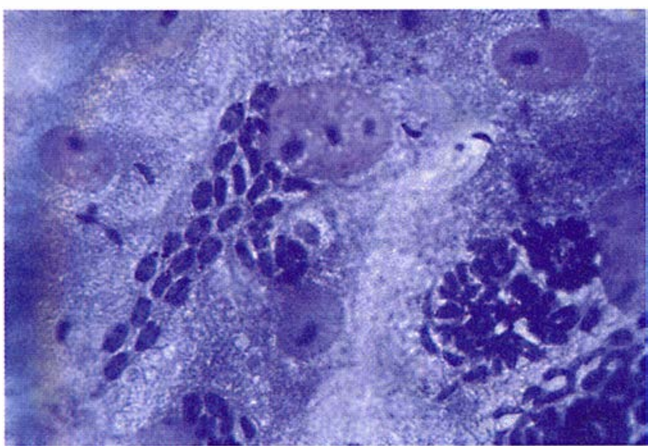
Desde hace bastante tiempo, los investigadores se vienen esforzando en desentrañar los mecanismos subyacentes en los procesos de reconocimiento de la célula huésped y en la evolución intracelular del parasitismo. Pero, por ahora, el estudio de los mecanismos fundamentales implicados en la interacción parásito-célula sólo pueden abordarse de manera adecuada *in vitro*, en cultivos celulares.

En los años treinta, se realizaron ya algunos trabajos preliminares por el grupo liderado por Hertha Meyer, del Instituto de Biofísica de la Universidad Federal de Rio de Janeiro. Establecieron métodos reproductivos que permitieron determinar *in vitro* los principales parámetros (tiempo invertido en la infección, duración de la división, diferenciación y otros) relacionados con el ciclo celular de *Trypanosoma cruzi* y *Toxoplasma gondii*, así como con el ciclo exo-eritrocítico del agente de la malaria aviar *Plasmodium gallinaceum*. Semejante enfoque se generalizó más tarde a los

WANDERLEY DE SOUZA, rector de la Universidad estatal de Norte Fluminense, lleva casi veinticinco años dedicado a la investigación sobre la interacción entre protozoos intracelulares y huésped.







1. CELULAS INFECTADAS por *Trypanosoma cruzi* (*arriba, a la izquierda*), *Leishmania amazonensis* (*arriba, a la derecha*) y *Toxoplasma gondii* (*abajo*); nos muestran un gran número de formas en multiplicación dentro del citoplasma. Los cultivos fueron fijados con metanol, teñidos con colorante de Giemsa y observados al microscopio óptico. (Fotografías realizadas por Técia Ulisses de Carvalho, Marcos André Vannier Santos, Andréa Martini y Edéseio de Melo.)

géneros *Leishmania*, *Eimeria* y otros. En 1977 se produjo una notable aportación al cultivo *in vitro* de los protozoos intracelulares, cuando James Jensen y William Trager, de la Universidad Rockefeller, reprodujeron el ciclo eritrocítico de *Plasmodium falciparum*, abriendo nuevas posibilidades para el estudio de la interacción entre parásitos del paludismo y eritrocitos.

¿Cuáles son las bases moleculares del proceso de reconocimiento entre parásito y célula huésped?

Los estudios realizados por diversos grupos señalan algunos factores que intervendrían en la fase inicial de contacto entre la superficie de la célula y el parásito. Entre ellos, parece sobresalir la carga de superficie en el caso de la interacción de *T. cruzi* con macrófagos. (Los macrófagos forman parte del sistema inmunitario de los vertebrados, desarrollan una intensa actividad endocítica y producen un número muy elevado de sustancias.) En 1976, demostré con Adolfo Martínez-Palomo, Carlos Argüello y Arturo Gonzales Robles, del Instituto Politécnico Nacional de México, que las partículas dotadas de carga positiva, así el hidróxido de hierro coloidal, se ligaban a la superficie del parásito; se apreciaba en la observación al microscopio electrónico de transmisión.

Posteriormente, comprobamos, mediante la técnica de electroforesis celular, por la que se mide el tiempo que tarda una célula en recorrer una distancia de varios micrometros cuando se halla sometida a una campo eléctrico de un gradiente de 4 volts por centímetro, que el tripomastigota, cierta forma infecciosa de *T. cruzi*, tenía su superficie más negativa que la forma no infecciosa, o epimastigota.

El trabajo llevado a cabo con Thais Souto-Padrón, del Instituto de Biofísica Carlos Chagas hijo, y Egler Chiari, de la Universidad Federal de Minas Gerais, nos reveló que el ácido siálico, asociado a proteínas (glicoproteínas) o a lípidos (glicolípidos), constituye el principal responsable de que la forma infecciosa de *T. cruzi* porte carga negativa. La presencia de ácido siálico en la forma no infecciosa de *T. cruzi* la descubrieron Miercio Pereira, Maria Aparecida Loures, Fernando Villata y Arnaldo Andrade en el Instituto de Microbiología de Rio de Janeiro. Dew puso en claro que la presencia de ácido siálico en la superficie de la forma infecciosa de *T. cruzi* dificultaba, por un lado, su penetración en los macrófagos, pero por otro facilitaba su permanencia en el espacio intercelular o en el torrente sanguíneo sin ser afectado por los factores humorales.

Desde 1945 se sabe, gracias a los experimentos realizados por Julio Muniz y Atilio Borrielo, del Instituto Oswaldo Cruz de Rio de Janeiro, que las formas no infecciosas de *T. cruzi* no tardan en ser lisadas cuando se las pone en contacto con suero fresco de mamífero, mientras que las formas infecciosas no resultan afectadas. Tales observaciones recibieron cuidadosa confirmación, treinta años después, por Nadia Nogueira, Celso Bianco y Zanvil Cohn, en la Universidad Rockefeller. Demostraron éstos que ello se debía a la capacidad que poseen las no infecciosas de activar el complemento, poder del que carecen las formas infecciosas. (El sistema del complemento está constituido por una serie de proteínas sanguíneas que intervienen en la respuesta inmunitaria, actuando de for-

ma independiente o en cooperación con los anticuerpos.)

En 1981, Teresa Kipnis y Wilmar Dias da Silva, de la Universidad de São Paulo, en colaboración con Alan Sher y John David, de Harvard, demostraron que la presencia de ácido siálico en la superficie de la forma tripomastigota de *T. cruzi* resulta crucial para su resistencia a la lisis mediada por el complemento: la remoción del ácido siálico para tratamiento de los parásitos mediante la enzima neuraminidasa provocaba que las formas infecciosas fueran sensibles a la lisis por el complemento. De ello parece inferirse que el ácido siálico ejerce una función protectora para el parásito.

Por nuestra parte, y en colaboración con Tania Cremonini de Araújo-Jorge, observamos que la eliminación del ácido siálico por acción de la neuraminidasa comportaba que los parásitos penetraran, con mayor celeridad y en número mayor, en el interior de los macrófagos.

La remoción del ácido siálico de la superficie celular, además de rebajar la negatividad de la superficie, deja expuestas las moléculas de galactosa o N-acetil-galactosamina, situadas debajo mismo del ácido siálico en la cadena oligosacarídica. Por lo datos disponibles, ambos factores refuerzan la capacidad de las formas tripomastigotas para introducirse en los macrófagos.

En 1983 Miercio Pereira mostró que *T. cruzi* poseía una neuraminidasa en su superficie. Con varios colegas del Hospital Clínico de Nueva Inglaterra en Boston, reveló que la enzima desempeñaba una función importante en la interacción entre *T. cruzi* y la célula. En 1985, el grupo de José Oswaldo Previato, del Instituto de Microbiología de Rio de Janeiro, señalaría que *T. cruzi* presenta en su superficie una transialidasa, capaz de transferir ácido siálico de un sustrato como fetuina a una macromolécula aceptora. Estas observaciones recibieron posterior confirmación en los laboratorios de Walter Colli y Bianca Zingales, de la Universidad de São Paulo.

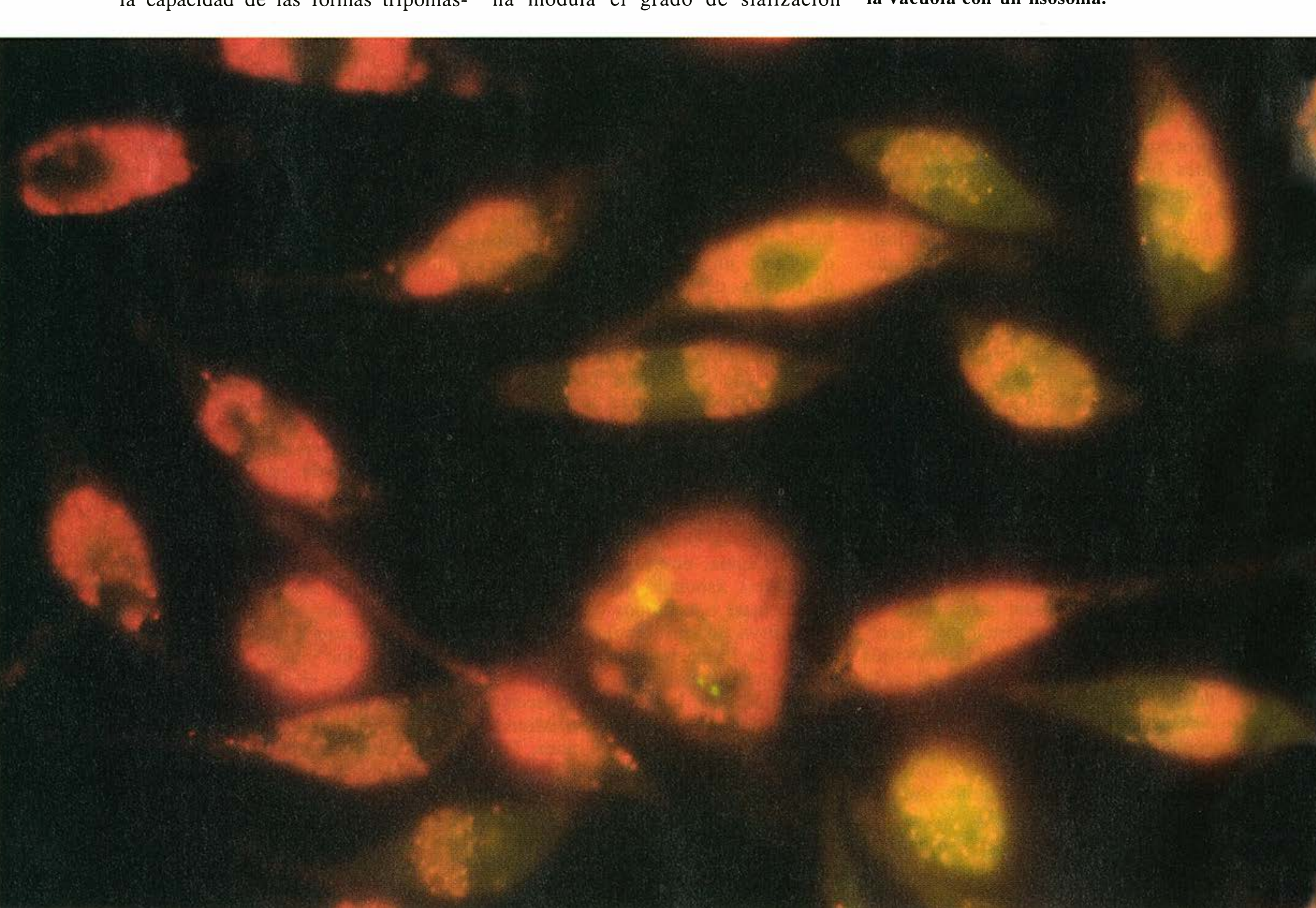
El trabajo ulterior realizado sobre todo por Sérgio Schenkman (hoy en la Escuela Paulista de Medicina en São Paulo) y Victor Nussenzweig, de la Facultad de Medicina de Nueva York, así como por Alberto Frasch y Alberto Parodi, de la Fundación Campomar de Buenos Aires, reveló que la neuroaminidasa y la transialidasa correspondían a la misma molécula.

Hoy se acepta que esa glicoproteína modula el grado de sialización de macromoléculas de superficie de *T. cruzi* y de la célula hospedadora.

Por nuestra parte, en colaboración con Thais Souto-Padrón y el grupo argentino hemos demostrado, por métodos inmunocitoquímicos, que la neuroaminidasa/transialidasa se aloja en la superficie de *T. cruzi*, así como en el interior de vesículas citoplasmáticas. Con Maria do Carmo Ciavíglia y Técia Ulisses de Carvalho arribamos al descubrimiento de que las células que expresan poco o ningún residuo de ácido siálico en su superficie apenas si experimentan la infección por *T. cruzi*. Sin embargo, el grado de infección de estas células alcanza valores normales cuando se incuban en un medio de fetuina y transialidasas de *T. cruzi*, situación en que varias moléculas son sializadas. A resultados similares llegó el grupo de Sérgio Schenkman.

Las pruebas obtenidas por distin-

2. MACROFAGOS DE RATON incubados en presencia de naranja de acridina y luego infectados con *Trypanosoma cruzi*. En esta imagen de microscopio de fluorescencia, el color anarajando señala estructuras con *p*H ácido; corresponden a los lisosomas de los macrófagos. En algunos casos puede observarse la presencia de vacuolas que encierran parásitos, donde el color anaranjado denuncia la fusión de la vacuola con un lisosoma.



tos grupos sugieren que los restos de carbohidratos de superficie desempeñan un papel importante en el proceso de interacción entre *T. cruzi* y la célula huésped. El grupo encabezado por Walter Colli, de la Universidad de São Paulo, y el dirigido por Mark Crane y James Dvorák, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, demostraron simultáneamente que la adición de N-acetil-D-glicosamina al medio de interacción bloqueaba la capacidad infectiva de *T. cruzi* en células epiteliales y fibroblastos.

Esas observaciones se generalizarían luego a los macrófagos en experimentos que realicé con Tania C. Araújo-Jorge; señalamos entonces la posible intervención, en el proceso de reconocimiento *T. cruzi*-célula huésped, de las macromoléculas con capacidad para enlazarse con la N-acetil-D-glicosamina y que tengan restos de este monosacárido expuesto. El equipo de Colli descubrió la presencia de Tc85, una glicoproteína con un peso molecular de 85.000 daltons, en la superficie de formas tripomastigotas. Los anticuerpos monoclonales que reconocen dicha glicoproteína bloquean la infección de *T. cruzi*.

Otro grupo, el de Ali Ouaissi, del Instituto Pasteur en Lille, descubrió en la superficie de *T. cruzi* una proteína de 85.000 daltons, que actúa de receptor de la fibronectina, glicoproteína presente en el espacio extracelular y en la superficie de distintos tipos celulares. Por nuestra parte, y mediante neoglicoproteínas (albúminas acopladas químicamente a monosacáridos) marcadas con partículas de oro coloidal, identificamos, en colaboración con Jens Degget y Thais Souto-Padrón, la presencia de proteínas con actividad lectínica para N-acetil-glicosamina en la superficie de *T. cruzi*.

No se sabe apenas nada sobre la participación de componentes de superficie en el proceso de interacción entre el parásito *Toxoplasma gondii* y la célula huésped. La investigación acometida en nuestro laboratorio, con el auxilio de Wagner Cintra, manifiesta que el protozoo posee una superficie atípica, sin restos de hidratos de carbono en la misma.

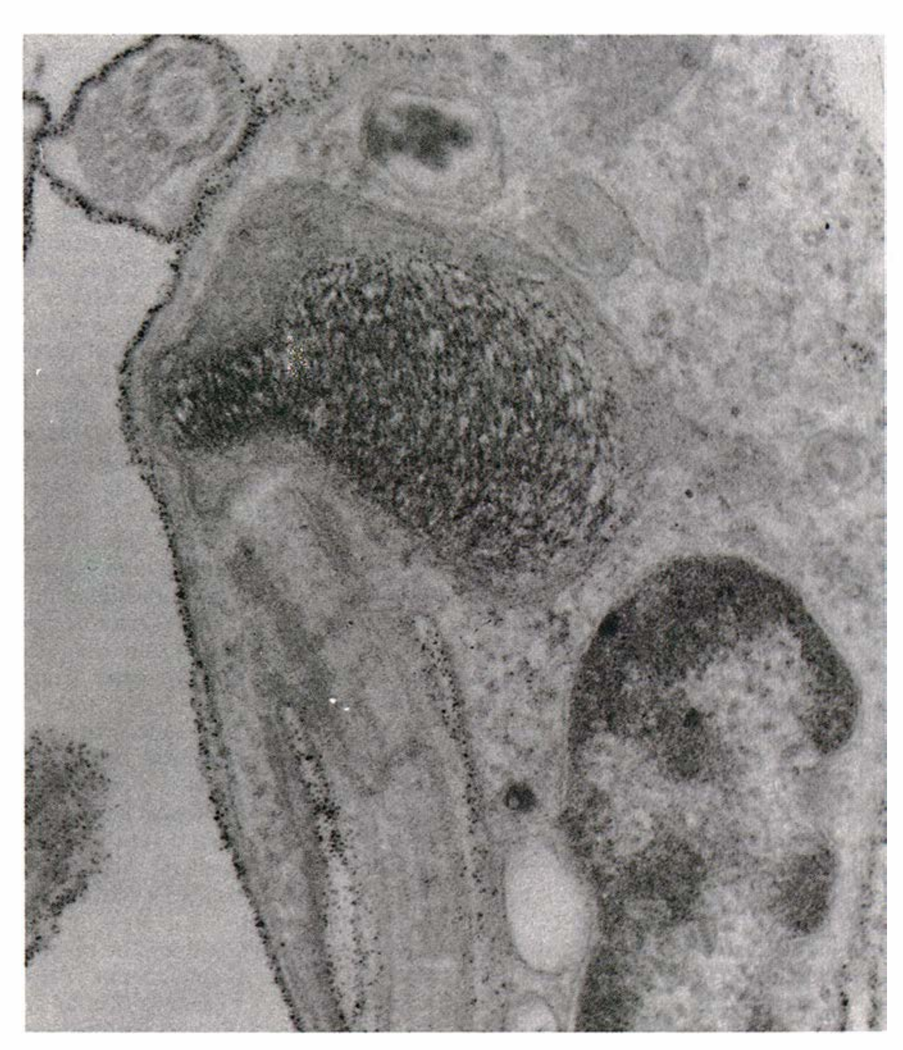
Conocemos algo mejor la interacción entre *Leishmania* y la célula que le da hospedaje. Lo mismo la forma infecciosa inoculada por el vector en el huésped vertebrado (o promastigota) que la hallada exclusivamente en el huésped vertebrado (o forma amastigota) atacan, de modo casi exclusivo, a los macrófagos.

En lo concerniente a la forma promastigota, se ha señalado que algunas moléculas de la superficie del parásito podrían ejercer una función destacada en el proceso de interacción con la célula huésped. Hay una molécula en particular que se conoce desde hace muchos años, merced a los trabajos pioneros de varios grupos (Lionel Schnur, Charles Grenblatt, Avivah Zuckerman y Joseph El-On, en la Universidad de Jerusalén; Angel Hernández y su equipo, en la Universidad Central da Venezuela; Salvatore Turco, en la Universidad de Kentucky; David Sacks, en el Instituto Nacional de la Salud en Bethesda; Emanuela Handman y colaboradores, en el Instituto Walter y Elisa Hall de Melbourne). Se trata de un factor segregado por el parásito, el lipofosfoglicano (LPG), que representa el principal glicoconjugado de la superficie de promastigotas de *Leishmania*.

El lipofosfoglicano consiste en un polímero de carbohidratos fosfatados y unidos, por un núcleo fosfohexasacarídico, al fosfatidil inositol que forma parte de la monocapa lipídica externa de la membrana plasmática del parásito. Los datos obtenidos por los equipos de David Sachs y Keith Joiner corroboran la intervención del LPG en la interacción entre componentes del complemento y los parásitos.

Conviene, a este respecto, distinguir dos tipos de formas promastigotas de *Leishmania*, capaces ambas de activar el complemento con unión de C3 a la superficie, generación de C3b y formación del complejo lítico C5b-9. Los promastigotas diferenciados (llamados también metacíclicos o infecciosos) se oponen a la lisis mediada por el sistema del complemento; los que no logren completar el proceso de maduración serán prestamente lisados.

El promastigota infeccioso puede aprovecharse de los componentes del sistema del complemento, expuestos en su superficie, para ser reconocido por los receptores superficiales del macrófago; en la superficie de esta



3. MICROPARTICULAS DE FERRITINA CATIONIZADA uniéndose a la superficie de una forma infecciosa de *Trypanosoma cruzi*. Esos marcadores nos revelan su carácter negativo. Podemos apreciar también la red de ADN extranuclear que constituye el cinetoplasto, el núcleo y el flagelo.



4. LOCALIZACION inmunocitoquímica de una glicoproteína de 85 kilodaltons en la superficie de formas infecciosas de *Trypanosoma cruzi*. La ubicación se demostró incubando inicialmente el parásito en presencia de anticuerpos monoclonales que reconocen la proteína y posteriormente con un segundo anticuerpo acoplado a partículas de oro coloidal.

célula carroñera hay receptores (CR1, CR3 y 150/95) que reconocen los componentes del complemento y facilitan la entrada del parásito en el interior celular. Uno de tales receptores puede reconocer directamente la porción sacarídica del LPG. La importancia de la participación de LPG en el proceso de interacción entre *Leishmania* y el macrófago quedó corroborada con los ensayos realizados por Emanuela Handman y James Goding en que mostraron que los anticuerpos que reconocen el lipofosfoglicano bloqueaban la asociación de *Leishmania* con el macrófago.

La superficie de cada promastigota de *Leishmania* porta casi 500.000 moléculas de una glicoproteína que se vincula a la membrana a través de un engarce de glicosilfosfatidil inositol. La proteína en cuestión, que responde al nombre de Gp63, es una proteasa con un peso molecular de 63.000 daltons. Es aceptora de C3, cuyo producto de desmembración C3bi sería reconocido por el receptor CR3 presente en la superficie de los macrófagos. Cabe, asimismo, que la porción glucídica de Gp63 sea reconocida por otros receptores instalados en la superficie del macrófago.

Aunque el LPG y la Gp63 constituyen los componentes mayoritarios de superficie de *Leishmania* más atendidos por los investigadores, no debemos olvidar el efecto ejercido por otras moléculas en el proceso de interacción entre ese parásito y los macrófagos. Los datos recogidos por el grupo de David Wyler, de la Universidad Tufts, corroborados por Marcos André Vannier Santos y Elvira Saraiva, de nuestro laboratorio, sugieren la posible intervención de los receptores de fibronectina encontrados en macrófagos. Otros aluden a la participación de nuevos receptores de la superficie del macrófago; por ejemplo, los que reconocen los dímeros de manosa-fucosa, la manosa-6-fosfato y los productos finales de la glicosilación en la interacción entre *Leishmania* y macrófago.

Supongamos que la célula huésped ha reconocido el parásito, ¿qué pasos da éste para penetrar en el interior de aquélla? Aunque se trata de un mecanismo muy debatido, se admite que, contemporáneamente a la entrada, se forma una vacuola parasitófora, a la manera de lo que ocurre en el proceso de endocitosis; en efecto, se ha observado que el parásito permanece encerrado en una bolsita de ésas, sin mantener contacto directo con las estructuras citoplasmáticas de la célula huésped.

En el caso de *T. cruzi*, las pruebas que obtuvimos en macrófagos, con ayuda de Maria Nazareth Meirelles y Tania C. Araújo-Jorge, dan a entender que la entrada depende, sobre todo, de la actividad de la célula huésped, que acomete una intensa formación de proyecciones de membrana al estilo de una fagocitosis clásica. El tratamiento de las células con citocalasinas, substancias producidas por ciertos hongos que inhiben la síntesis de filamentos de actina, bloquea la infección parasitaria. Por otro lado, la observación microscópica confirma también el curso fagocítico seguido en la interacción entre la célula y *T. cruzi*.

La explicación de la infección celular mediante un fenómeno de fagocitosis se cumple también a propósito del género *Leishmania*, según han manifestado los grupos de James Alexander, de la Universidad de Glasgow, y de Kwang Poo Chang y Dennis Dwyer, de la Rockefeller.

Mayor complejidad reviste el proceso de invasión celular por *Toxoplasma gondii*. A semejanza de lo visto para *T. cruzi*, ese protozoo se introduce en casi cualquier célula eucariota. Despliega en su extremidad anterior todo un repertorio de orgánulos secretores (roptrias, micronemas, cuerpos densos), amén de una tupida red de microtúbulos en conoide, que participan en la invasión celular. En 1970, y en nuestro laboratorio, Hertha Meyer y Marisa Musacchio mostraron que *T. gondii* podía entrar en las células en unos 10 segundos. Dos años después, Thomas Jones y James Hirsch, de la Universidad Rockefeller, ofrecían imágenes nítidas del proceso fagocítico implicado en la interacción entre *T. gondii* y la célula huésped. En 1982, Sonia Silva y Sergio Meirelles, tras ensayos realizados en nuestro laboratorio, llegaron a la conclusión según la cual el bloqueo absoluto de la actividad fagocítica —mediante la incubación a baja temperatura o en presencia de citocalasina— inhibía en un 50 % el proceso de infección celular. Por su parte, Barbara Nichols, de la Universidad de California en San Francisco, mostró imágenes de alteraciones de la membrana celular en las zonas por donde penetra el parásito.

Y se ha comprobado que, en esos casos, se establece, entre la membrana del protozoo y la de la célula huésped, una suerte de juntura móvil, que permite la entrada del parásito en un proceso semejante al utilizado por el merozoito de *Plasmodium* para penetrar en el interior de los eritrocitos, que fue estudiado por el equipo de Masamichi Aikawa, de la Universidad Case Western. De esa gavilla de datos parece inferirse que *T. gondii* se introduce en la célula huésped por una doble vía alternativa. Capacidad que le resulta rentable, pues el parásito degenera si persiste en el espacio intercelular.

Sabido es que los macrófagos se interponen en la actividad de otras células, como los linfocitos, pero reciben también el influjo de factores producidos por los linfocitos (linfocinas) o por otras células. Esos factores pueden condicionar mucho el comportamiento de los macrófagos, incluida su relación con los protozoos. Se ha comprobado que, cuando los macrófagos quedan expuestos a determinados estímulos, así cierta sustancia o célula, se desencadena una serie coordenada de episodios metabólicos, con aumento en el consumo de oxígeno y producción de derivados del oxígeno: radical superóxido (O_2^-) y agua oxigenada (H_2O_2), en una reacción en la que intervienen como elementos de partida el NADPH y el O_2.

Ese proceso de explosión respiratoria varía en intensidad de acuerdo con la naturaleza del factor estimulante y el estado funcional del ma-

crófago; cuenta con la participación fundamental de las enzimas NADH- y NAD(P)H-oxidasa, presentes en la membrana plasmática de las células fagocíticas. Abundan los indicios de que los productos generados a partir de O_2 ejercen una intensa acción microbicida.

De una manera general, cuando la mayoría de los microorganismos interactúa con la superficie de macrófagos se pone en marcha la maquinaria que conduce a la síntesis de derivados de la molécula de oxígeno, siendo enseguida ingeridos o destruidos. Algunos protozoos intracelulares, sin embargo, desarrollarán mecanismos básicos para burlar la eficaz actuación microbicida de los macrófagos. Uno de tales mecanismos estriba en interactuar con la superficie del macrófago, mediante la activación del sistema de producción de derivados del O_2; así acontece con *T. gondii*, que se sirve de ese medio para penetrar y sobrevivir en el interior del macrófago, no obstante su extrema sensibilidad a esos productos, según pusieron de manifiesto, en 1979, Henry Murray y Zanvil Cohn, de la Universidad Rockefeller.

Al relacionarse con la superficie del macrófago, las formas interactivas de *T. cruzi* y de *Leishmania* activan sólo débilmente el sistema NAD(P)H-oxidasa; por consiguiente, no basta la cantidad de productos formados para destruirlos. Lo que no sucede con las formas benignas de estos protozoos que, al interactuar con los macrófagos, estimulan intensamente la producción de O_2^- y H_2O_2, y son destruidas de inmediato. En estudios citoquímicos realizados en colaboración con Técia Ulisses de Carvalho, demostramos que el sistema NAD(P)H-oxidasa sólo se estimula en las zonas de contacto entre parásito y macrófago.

A tenor de los datos disponibles, existen por lo menos dos factores que minan la capacidad de los macrófagos en producir derivados del oxígeno. El primero guarda relación con la naturaleza del componente de superficie del macrófago que interactúe con la superficie del parásito. En el caso de *T. gondii*, su revestimiento por anticuerpos determina que la interacción con el macrófago se realice a través de una glicoproteína localizada en la superficie del macrófago que reconoce la porción Fc de la inmunoglobulina: el receptor para Fc. Tal unión activa la enzima NAD(P)H-oxidasa, con la consiguiente producción de niveles de O_2^- y H_2O_2 suficientes para destruir rápidamente el parásito, muy sensible a esos productos.



5. FASE INICIAL de la interacción entre el protozoo *Trypanosoma cruzi* y macrófagos peritoneales del ratón, observada al microscopio electrónico de barrido. Las proyecciones de superficie del macrófago (*flecha*) sirven para la introducción del parásito en el interior celular. (Fotografía de Thais Souto-Padrón y Wanderley de Souza.)

Cuando el protozoo ofrece mayor resistencia a tales sustancias, como observamos en las formas infecciosas de *T. cruzi* y de *Leishmania*, el revestimiento de la superficie del parásito por inmunoglobulinas no conduce a su destrucción. En estos casos suele observarse una mayor entrada de parásitos en los macrófagos con el crecimiento consiguiente de la carga parasitaria intracelular, merced al aumento del rendimiento del proceso fagocítico que resulta de la intervención de los receptores de Fc.

Por lo que atañe a *Leishmania*, los experimentos llevados a cabo por Keith Joiner y David Sacks nos indican que las formas infecciosas del protozoo se engarzan a factores del complemento, lo que en otros casos provocaría la lisis celular; se sirven de tales sustancias para penetrar en los macrófagos a través de receptores del complemento instalados en la superficie de estas células y que no activan la NAD(P)H-oxidasa.

El segundo factor que se interpone en la capacidad de los macrófagos para producir derivados del oxígeno tiene que ver con su estado funcional. Los macrófagos residentes presentan una pequeña concentración de NAD(P)H-oxidasa en la membrana y producen bajas concentraciones de derivados de O_2, aun cuando reciban el estímulo adecuado. Esas concentraciones podrían bastar para acabar con microorganismos muy sensibles, *T. gondii* por ejemplo.

Pero los macrófagos, cuando entran en contacto con sustancias fabricadas por los linfocitos (interferón gamma y factor de necrosis tumoral), pueden pasar a un estado de activación, en el que aparecen alteradas varias propiedades básicas. Los macrófagos activados generan grandes cantidades de derivados de O_2, y destruyen los protozoos, con inde-

pendencia de que estén o no revestidos de inmunoglobulinas. Tales macrófagos del huésped vertebrado desempeñan un papel importante en el control de la infección por *T. cruzi, Leishmania* y *Toxoplasma*.

Una segunda vía de destrucción de parásitos, intensamente estudiada en los últimos años, se refiere al óxido nítrico, resultante de la oxidación de la L-arginina y formado juntamente con citrulina, por acción de la enzima óxido-nítrico-sintetasa. Carol Nacy, del Instituto Walter Reed, y F. Liew, de los laboratorios Wellcome, entre otros, han obtenido pruebas que avalan la importancia del NO en la destrucción de protozoos intracelulares por macrófagos.

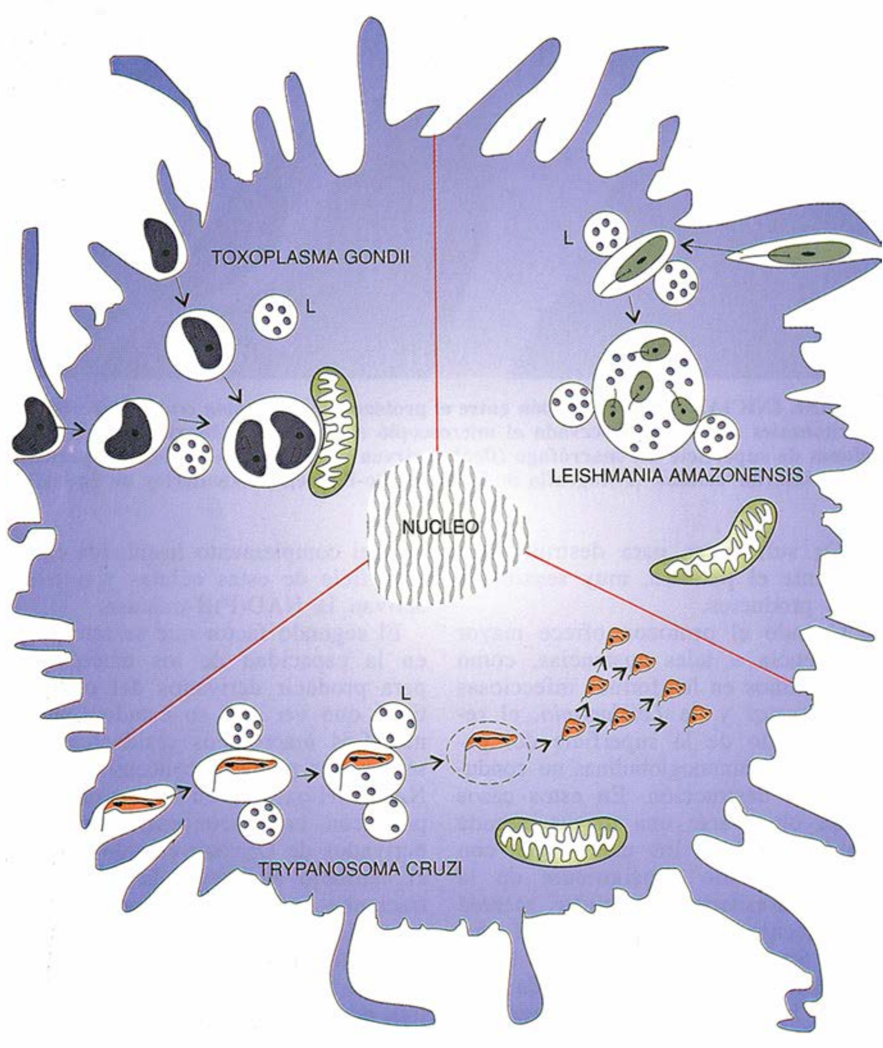
Ya tenemos el protozoo en el interior celular, en su vacuola parasitófora, delimitada por una membrana. La microscopía electrónica de transmisión ha revelado que dicha membrana vacuolar se ha formado con materiales procedentes de la membrana plasmática del macrófago. En colaboración con Maria Nazareth Meirelles, Paulo Pimenta y Laís de Carvalho, analizamos la distribución de algunos marcadores de membrana de los macrófagos (enzimas, hidratos de carbono y agrupamientos aniónicos) durante el proceso de infección por protozoos, y hallamos que la mayoría de estos marcadores no se había interiorizado, ni, por tanto, aparecían en la membrana vacuolar. En condiciones normales, los agrupamientos aniónicos superficiales de *T. gondii* aparecen interiorizados y forman parte de la membrana de la vacuola; pero no están interiorizados cuando el parásito penetra con la mediación de los receptores de Fc.

En efecto, se forma allí una vacuola endocítica, similar en sus propiedades a las que contienen parásitos y lisosomas de la célula huésped; los agrupamientos aniónicos se aproximan, tras la fusión de las membranas de las dos estructuras, y descargan su contenido en el interior de la vacuola parasitófora. La acidez del *p*H, vinculada a la presencia de enzimas (proteasas, lipasas y glicosidasas), posibilita que el contenido lisosómico ejerza un efecto microbicida, avivando la digestión del material ingerido.

Ese proceso interviene, de consuno con el iniciado en la superficie celular con la activación de NAD(P)H-oxidasa, en la acción microbicida de los macrófagos. Aquí también los protozoos intracelulares desarrollarán ciertas estrategias para evitar que el proceso de fusión entre lisosoma y vacuola parasitófora tenga un efecto microbicida. La primera providencia consiste en evitar que se produzca la fusión entre lisosomas de la célula huésped con la vacuola parasitófora.

Debemos a Thomas Jones y James Hirsch un elegante experimento a través del cual sacaron a la luz, en 1972, ese mecanismo. En cultivos celulares introdujeron torotrasto, una sustancia electrondensa que se incorpora en las células a través de pequeñas vesículas que se funden luego con los lisosomas, que así quedan marcados con el torotrasto. Expusieron las células a la infección por *T. gondii*. Y comprobaron que los lisosomas marcados se alojaban muy próximos, aunque sin fundirse con las vacuolas parasitóforas que encerraban parásitos vivos. Pero si los parásitos se incubaban en presencia de anticuerpos específicos, o estaban muertos por fijación con glutaraldehído antes de la interacción, se les hallaba en vacuolas parasitóforas marcadas con torotrasto, señal de que se habían fusionado con los lisomas.

Esos experimentos, confirmados en diversos laboratorios, revelan que *T. gondii* (igual que *Legionella pneumophila, Mycobacterium tuberculosis* y *Chlamydia psittaci*) ponen en marcha un mecanismo que bloquea el proceso de fusión del lisosoma con el fagosoma. Pero no se bloquea en las infecciones producidas por *T. cruzi* y *Leishmania*.



6. PROCESO DE ENTRADA de *Toxoplasma gondii*, *Leishmania amazonensis* y *Trypanosoma cruzi* en la célula huésped, así como el comportamiento intracelular de estos protozoos. En el caso de *T. gondii* los lisosomas (*L*) de la célula huésped no se fusionan con la vacuola parasitófora, en torno a la cual se concentran, sin embargo, las mitocondrias. En el caso de *L. amazonensis* y *T. cruzi*, vacuola parasitófora y lisosomas celulares se fusionan; las formas amastigotas de *L. amazonensis* proliferan en el interior de la vacuola, en tanto que *T. cruzi* destruye la membrana vacuolar y comienza a multiplicarse en contacto directo con el citoplasma de la célula huésped.

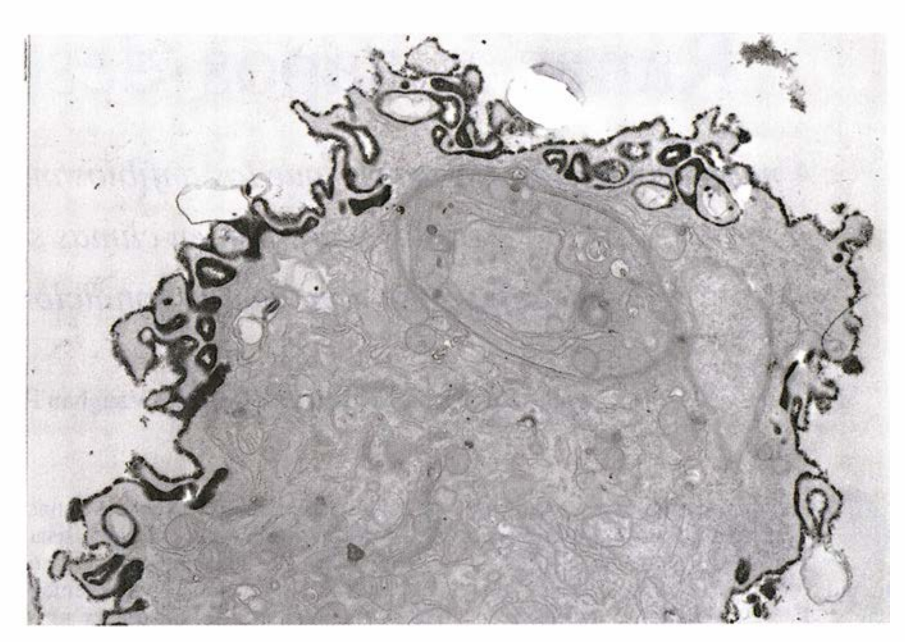
Con la idea de comprobar si la presencia de *T. gondii* incapacitaba la célula infectada para que sus lisosomas se fusionaran con vacuolas parasitóforas, acometí en colaboración con Maria Nazareth Meirelles un ex-

perimento en el que los macrófagos cuyos lisosomas estuvieran marcados (con peroxidasa en vez de torotrasto) quedaban expuestos a la infección de *T. gondii* y de *T. cruzi*. Observamos en la misma célula que la fusión del lisosoma con la vacuola parasitófora ocurría en las vacuolas de *T. cruzi* pero no en las que se halla encerrado *T. gondii*. De lo que se infiere que la ausencia de fusión constituye un rasgo característico del protozoo, que tiene que ver sin duda con la naturaleza de los componentes de la membrana de la vacuola parasitófora.

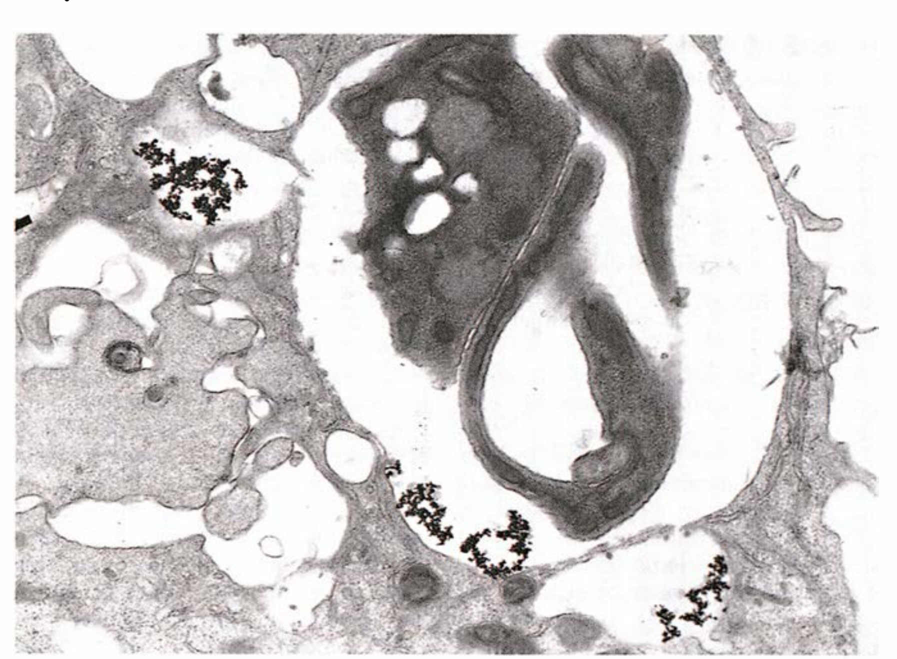
¿Cómo sobreviven los protozoos en vacuolas parasitóforas que se fusionan con los lisosomas de la célula huésped? Por lo que a *Leishmania* concierne, los datos señalan que el bajo *p*H de la vacuola parasitófora facilita la multiplicación de las formas amastigotas. No conocemos todavía bien el mecanismo subyacente de la resistencia de las formas amastigotas a la acción de enzimas lisosómicas.

En el caso de *T. cruzi* los experimentos pioneros de Yvonne Kress, Herbert Tanowitz, Barry Bloom y Murray Wittner, de la Facultad Albert Einstein de Medicina en Nueva York, y Regina Midel y Judith Kloctzel, del Instituto de Medicina Tropical de São Paulo, posteriormente confirmados por Técia Ulisses de Carvalho en nuestro laboratorio, revelan que en el interior celular se produce la fusión de los lisosomas con la vacuola parasitófora. Mas, a diferencia de lo que acontece con *T. gondii* y *Leishmania* (que permanecen durante toda su vida intracelular en el interior de la vacuola), *T. cruzi* destruye la membrana de la vacuola y pasa, luego de su transformación en la forma amastigota, a multiplicarse en contacto directo con el citoplasma de la célula huésped. Las observaciones realizadas con el microscopio electrónico de transmisión por Técia Ulisses de Carvalho señalaron que la desintegración de la membrana se producía en ciertos puntos. Norma Andrews demostró más tarde que *T. cruzi* puede liberar una hemolisina, con propiedades semejantes a las de los componentes del complemento; esa sustancia podría unirse a la membrana de la vacuola parasitófora, iniciando su desestabilización.

Toda esta gavilla de experimentos nos vienen a indicar que ciertos protozoos han desarrollado interesantes mecanismos de adaptación biológica que les asegura su pervivencia en las células de los vertebrados. El estudio de esas estrategias podría ofrecernos pistas importantes para abordar el control de las infecciones parasitarias.



7. MACROFAGO incubado en presencia de *Toxoplasma gondii* para su procesamiento posterior en orden a identificar la enzima magnesio-ATPasa. El parásito aparece en el interior de una vacuola citoplasmática delimitada por una membrana (*arriba*), sin presentar productos de reacción, lo que no acontece con la membrana plasmática, donde se desarrolla una reacción intensa. (Fotografía de Laís de Carvalho y Wanderley de Souza.)



8. MACROFAGO DE RATON incubado en presencia de albúmina-oro, que se concentra en los lisosomas. Durante una hora se incubaron luego las células en presencia de *Trypanosoma cruzi* y fueron procesadas por microscopía electrónica de transmisión. La existencia de lisosomas en la vecindad de una vacuola parasitófora y de partículas de oro en el interior de la vacuola denuncia el proceso de fusión.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE BIOLOGY OF *TRYPANOSOMA CRUZI*-MACROPHAGE INTERACTION. Tania Cremonini Araújo-Jorge, en *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, vol. 84, págs. 441-462, 1989.

TOXOPLASMA GONDII - NEW ADVANCES IN CELLULAR AND MOLECULAR BIOLOGY. R. McLeod, D. Mack y C. Brown, en *Experimental Parasitology*, vol. 72, págs. 109-121, 1991.

TOXOPLASMA GONDII: FUSION COMPETENCE OF PARASITOPHOROUS VACUOLES IN FC RECEPTOR-TRANSFECTED FIBROBLASTS. K. A. Joiner, S. A. Fuhrman, H. M. Miettinen, L. H. Kasper e I. Mellman, en *Science*, vol. 249, págs. 641-646, 1990.

CELL BIOLOGY OF *PLASMODIUM*. Margareth Perkins, en *Cell Biology of Parasites*. Dirigido por David J. Wyler. W. H. Freeman and Company, Nueva York; págs. 5-23, 1990.

Ranas y sapos desertícolas

A nadie se le ocurriría pensar que los anfibios morasen en los desiertos. Pero los que viven en climas secos saben adaptarse a la vida en condiciones extremas

Lon L. McClanahan, Rodolfo Ruibal y Vaughan H. Shoemaker

Con su piel húmeda y hábitos acuáticos, ranas y sapos parecen plenamente adaptados a la vida en charcas y ríos, o sus aledaños. Pero los hallamos también en las regiones áridas de todo el mundo, desde el desierto californiano del Colorado hasta las sabanas africanas. Para sobrevivir en tales climas han desarrollado mecanismos fisiológicos y de comportamiento que les permiten retener el agua y permanecer frescos.

La gama de adaptaciones observada por nosotros y otros biólogos desafía ideas arraigadas sobre la fisiología de los anuros, es decir, de ranas y sapos. Cuanto sabíamos sobre estos anfibios procedía de la investigación en especies de climas templados; el estudio de las que viven en desiertos nos ha permitido vislumbrar la notable diversidad que les distingue.

Hace unos 300 millones de años, los anfibios fueron los primeros vertebrados que invadieron la tierra emergida; siguen conservando una estrecha vinculación con el agua dulce. Los anfibios modernos abarcan salamandras, cecilias (anfibios ápodos que parecen lombrices) y anuros. Contrariamente a una percepción intuitiva, no existe una distinción biológica que separe a ranas y sapos; a los anuros terrestres de piel verrugosa se les suele llamar sapos, y ranas a las formas acuáticas de piel lisa. La mayoría de los anfibios ponen sus huevos en el agua y presentan larvas que llevan una existencia propia de un pez hasta que experimentan la metamorfosis. Una vez equipados con patas y pulmones, pasan al menos algún tiempo en tierra.

Pese a su capacidad para sobrevivir en tierra firme, la mayoría de los anfibios habitan en lugares cercanos a masas de agua dulce o a zonas de humedad y pluviosidad elevadas. No son muchos los que moran en regiones áridas. Esta distribución geográfica refleja la fisiología de los anfibios: por lo general, no se hallan bien adaptados para soportar los rigores del desierto.

Otros vertebrados terrestres (que engloban reptiles, aves y mamíferos) poseen un tegumento, o piel, que los protege contra la desecación. La parte externa, o estrato córneo, consta de múltiples capas de células epidérmicas planas y muertas. Esta piel impide la pérdida de agua. A diferencia de tales vertebrados, los anfibios se caracterizan por un estrato córneo constituido por una sola capa de células. La piel de éstos, muy permeable, ofrece algunas ventajas; a través de ella, los anfibios, que no beben, absorben agua de las superficies húmedas, como rocas u hojas empapadas, y lo mismo del suelo que de las charcas. El oxígeno y el dióxido de carbono atraviesan fácilmente la piel; a modo de ejemplo, las salamandras sin pulmones fían en el tegumento para el intercambio gaseoso.

Magníficamente adaptada para absorber agua, la delgada piel de los anfibios es, también, un conducto perfecto para la evaporación. En condiciones moderadas de temperatura y humedad, la mayoría de ellos no pueden sobrevivir más allá de un día al aire libre porque se deshidratan en seguida. Ni siquera los anuros, que soportan pérdidas hídricas mucho mayores que los demás vertebrados, se hallan a salvo en esa situación.

Los anfibios se separan también de

LON L. McCLANAHAN, RODOLFO RUIBAL y VAUGHAN H. SHOEMAKER llevan más de 20 años estudiando ranas y sapos desertícolas. Su asociación se inició en 1965, cuando McClanahan era un doctorando que trabajaba con Ruibal en la Universidad de California en Riverside y Shoemaker llegó allí como profesor adjunto. Los tres compartieron campañas de investigación en los desiertos de ambos hemisferios americanos. Descubrieron extrañas adaptaciones en los anfibios que viven en el hábitat único del Gran Chaco.



1. *PHYLLOMEDUSA SAUVAGEI* es una rana arborícola adaptada a las regiones áridas. Este anuro puede sobrevivir en ambientes cálidos y secos porque tolera elevadas temperaturas corporales. Retiene agua, pues pierde poco líquido a través de su piel o de su sistema excretor.

otros vertebrados por la manera en que excretan sus desechos. Los riñones de los animales desertícolas tienen que responder al reto de retener agua sin dejar de eliminar los desechos nitrogenados que se producen durante el metabolismo de las proteínas y de otros compuestos que contienen nitrógeno. Aves y reptiles han resuelto el problema mediante la síntesis de ácido úrico, un compuesto rico en nitrógeno y poco soluble; excretan ese desecho en forma de precipitado sólido, y pierden así poca agua. Los mamíferos incorporan su nitrógeno de desecho a la urea, molécula hidrosoluble; retienen un agua preciosa al producir orina con una elevada concentración de materiales disueltos, urea y sales sobre todo. Esta particularidad la han refinado en grado sumo los roedores desertícolas; así, la rata canguro expulsa una orina que es 14 veces más concentrada que la sangre, y los ratones desertícolas australianos alcanzan proporciones de 40 o más.

Como los mamíferos, los anuros adultos suelen producir urea, pero, a diferencia de aquéllos, no pueden fabricar orina más concentrada que la sangre. Precisan, pues, una gran cantidad de agua para eliminar sus desechos. Asimismo, la mayoría de los anfibios toleran peor temperaturas corporales elevadas que el resto de los vertebrados terrestres. Aves, mamíferos y lagartos desertícolas pueden mantener temperaturas corporales de unos 40 grados Celsius; muchas ranas y sapos, sin embargo, mueren si alcanzan los 35 grados C, e incluso antes.

Las ranas y los sapos terrestres comparten determinados rasgos que les ayudan a contrarrestar los inconvenientes derivados de su piel permeable y riñones ineficientes. Si no disponen de agua, dejan de producir orina y acumulan desechos en los fluidos corporales. La deshidratación insta cambios oportunos en la piel y la vejiga urinaria; se refuerza la permeabilidad de la vejiga para compensar el agua perdida por evaporación con agua recuperada de la orina diluida. Además, absorben agua a través de la piel con mucha más facilidad que cuando están hidratados. En el control de estas respuestas interviene la arginina vasotocina, una hormona de la pituitaria posterior.

Por útiles que sean a corto plazo, estas medidas protectoras no les permiten sobrevivir mucho tiempo sin agua en ambientes cálidos y secos. Por eso, las ranas y los sapos de estas regiones han desarrollado estrategias complementarias. Quizá la adaptación más directa a la vida en las tierras secas sea la de permanecer cerca de la poca agua de que se pueda disponer; y eso es lo que hacen muchas especies de anfibios. Manantiales, rezumaderos, cañones que drenan terrenos altos, así como embalses construidos por el hombre, constituyen fuentes de agua permanente donde podemos encontrar ranas.

La rana arborícola de California, *Hyla cadaverina*, que vive en el desierto del Colorado, es uno de tales habitantes de oasis. Mora cerca de rezumaderos y charcos permanentes. Aunque la temperatura ambiente suele superar los 40 grados C, la temperatura corporal del anfibio no pasa de los 30 grados C, gracias a un mecanismo de enfriamiento por evaporación. *H. cadaverina* almacena hasta el 25 por ciento de su peso



corporal en forma de orina diluida. El agua que pierde por evaporación, se recicla a partir de la orina y vuelve a incorporarse al cuerpo. Cuando estas reservas se agotan, las ranas retornan al rezumadero y absorben más agua.

Los rezumaderos constituyen el lugar de apareamiento de las ranas y maduración de los huevos. Pasan los días de verano hacinadas en masa cerca de charcas permanentes. No acaba de conocerse el motivo de ese apelotonamiento; tal vez se pretende con ello reducir la cantidad de agua que un individuo pierde. Conforme va trancurriendo la tarde, se dispersan perezosamente y empiezan a comer en el borde del agua mientras se preparan para la noche, tiempo en el que croan a coro, se aparean y

Adaptaciones de los anuros de regiones áridas

DESIERTO DEL COLORADO

Hyla cadaverina
(arriba, izquierda)
La rana vive cerca de reservas de agua permanentes en el desierto. Puede almacenar hasta el 25 por ciento de su peso corporal en forma de orina diluida. Si pierde agua a través de la piel, puede reabsorber la que guarda en la vejiga.

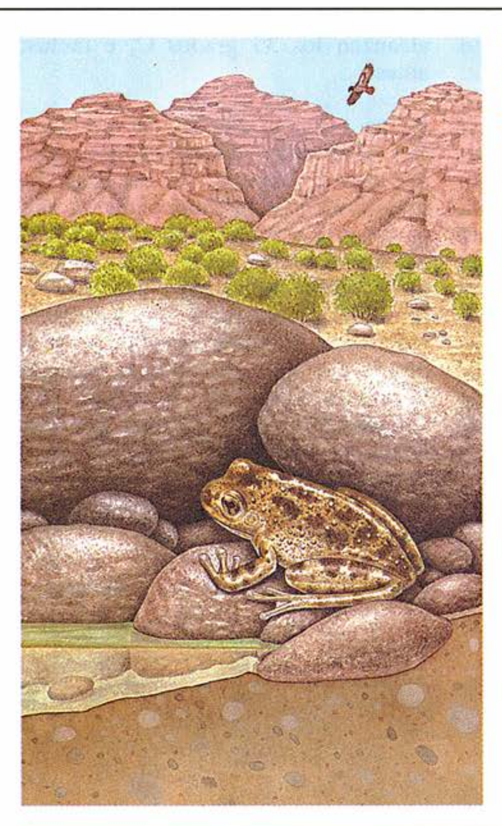
Scaphiopus couchii
(arriba, centro)
Este sapo habita en zonas del desierto sin reservas hídricas en todo el año. Para sobrevivir a la estación seca, el sapo se entierra, incluso hasta a un metro de profundidad. Así han logrado sobrevivir algunos tras dos años de sequía.

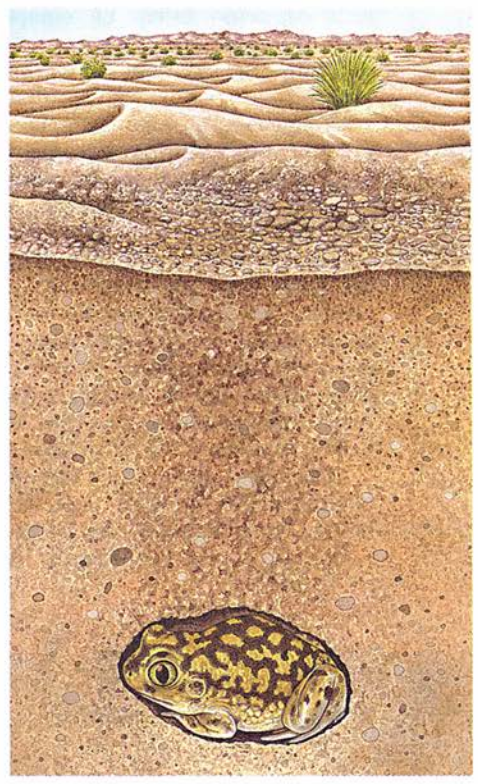
Bufo punctatus
(arriba, derecha)
En busca de comida, este sapo se aleja de las fuentes de agua hasta 100 metros. Para mantenerse frío, se refugia en las grietas de las rocas y, como *H. cadaverina*, recicla agua a partir de la orina. *Bufo punctatus* tolera pérdidas de hasta el 40 por ciento de su agua corporal. (Por mor de comparación, la resistencia de los camellos llega sólo a una reducción del 20 por ciento.)

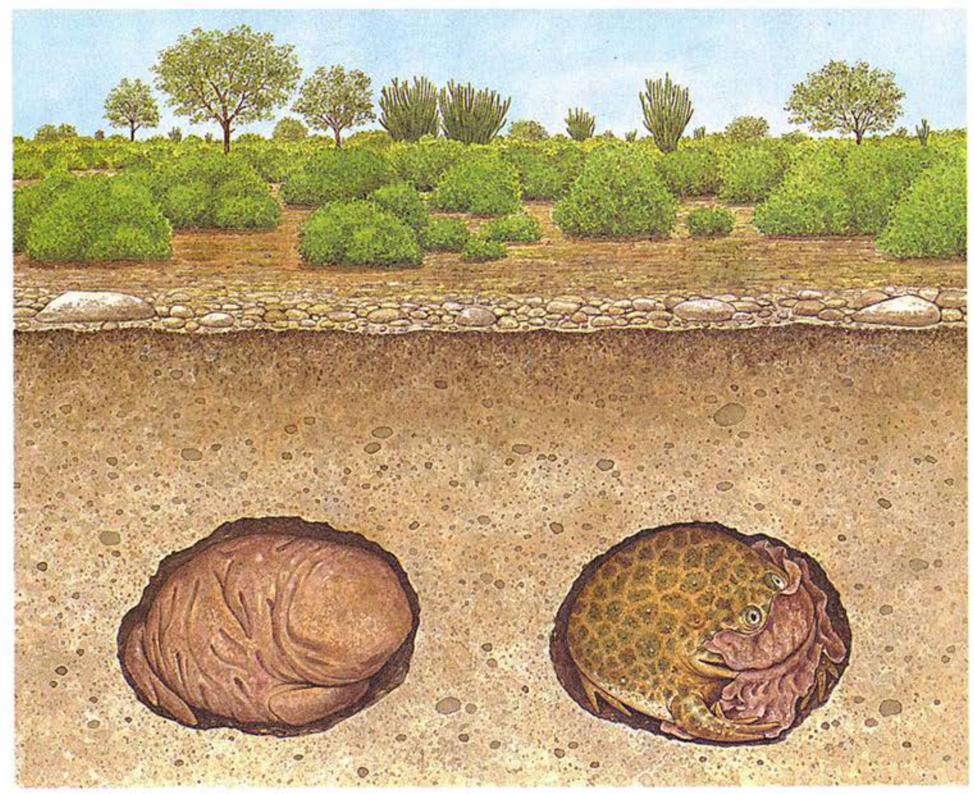
REGION DEL GRAN CHACO

Lepidobatrachus laevis
(abajo, izquierda)
Sobrevive a los períodos secos excavando en el fango y sepultándose. Construye un capullo de varias capas (*parte izquierda de la figura*) para resistir la pérdida de agua. Al comienzo de la estación de las lluvias, el sapo tira del capullo y se lo come (*parte derecha de la figura*). Después, sale a la superficie.

Phyllomedusa sauvagei
(abajo, derecha)
Esta rana arborícola se recubre con una sustancia cérea para evitar la pérdida de agua. También excreta ácido úrico para retenerla. *P. sauvagei* es el único anuro que bebe agua: la mayoría la absorben a través de la piel, pero *Phyllomedusa* deja que las gotas de agua lleguen al interior de su boca casi cerrada.

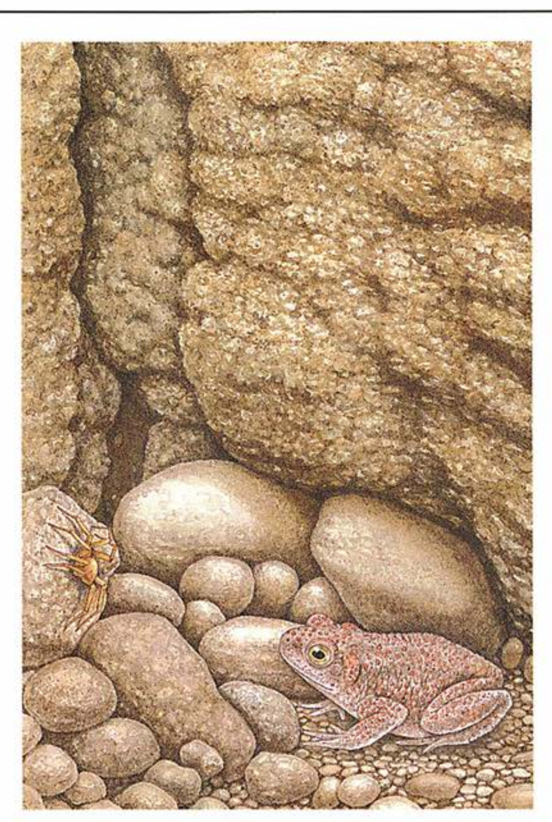






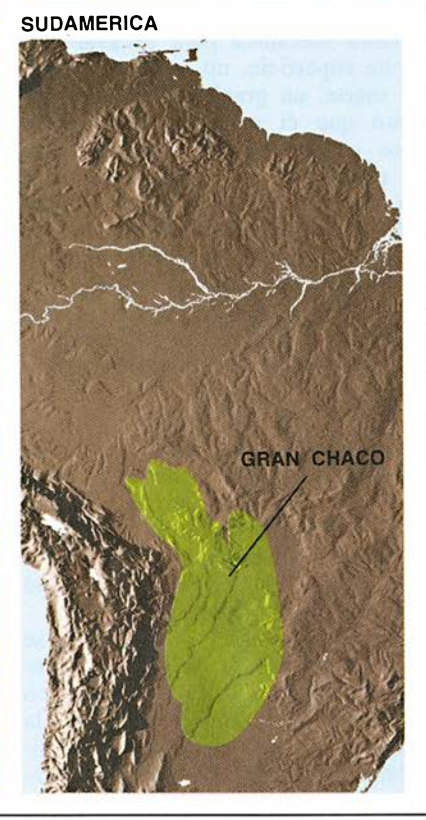
ponen huevos en la charca. Si la lluvia forma otras charcas, las ranas se dispersan y también ponen huevos en estas aguas.

El sapo de puntos rojos, *Bufo punctatus*, freza en las aguas de los cañones del desierto del Colorado. Pero, a diferencia de *H. cadaverina*, no reside permanentemente en un ambiente húmedo. Aplicamos transmisores para seguir la pista de individuos que se alejaban del agua hasta un centenar de metros. En pleno día de verano descubrimos sapos amadrigados en las grietas del suelo rocoso situadas lejos del agua. Estas oquedades proporcionan un refugio que se comparte con otros miembros de la misma especie: en cierta hendidura llegamos a encontrar ocho individuos.









Sabedores de su incapacidad para tolerar temperaturas superiores a los 35 grados C, supusimos que los sapos buscaban microhábitats que permanecieran bastante frescos durante el día, hipótesis que se confirmó tras implantarles equipos emisores y sensores de temperatura. En efecto, seguimos la pista de un sapo desde septiembre, cuando toca a su fin la estación activa, hasta diciembre, uno de los meses más fríos. De noche, durante la estación cálida, andaba 85 metros desde su madriguera hasta un pequeño arroyo; con la amanecida, volvía al mismo refugio.

Se trata de una estrategia eficaz. Durante los meses en que el sapo se mostraba activo, la temperatura diurna del aire acostumbraba exceder los límites críticos del animal, pero su temperatura corporal no superó los 31 grados C. Las temperaturas moderadas de la madriguera, así como la evaporación, controlaban la temperatura corporal del sapo. Y resultó vital también la selección del hábitat en el período de su inactividad invernal, pues le protegía de los fríos nocturnos. En diciembre, cuando la temperatura al aire libre oscilaba entre 12 grados C a la puesta del sol y cuatro grados al alba, la temperatura del sapo en el interior de la madriguera permaneció constante en 25 grados C.

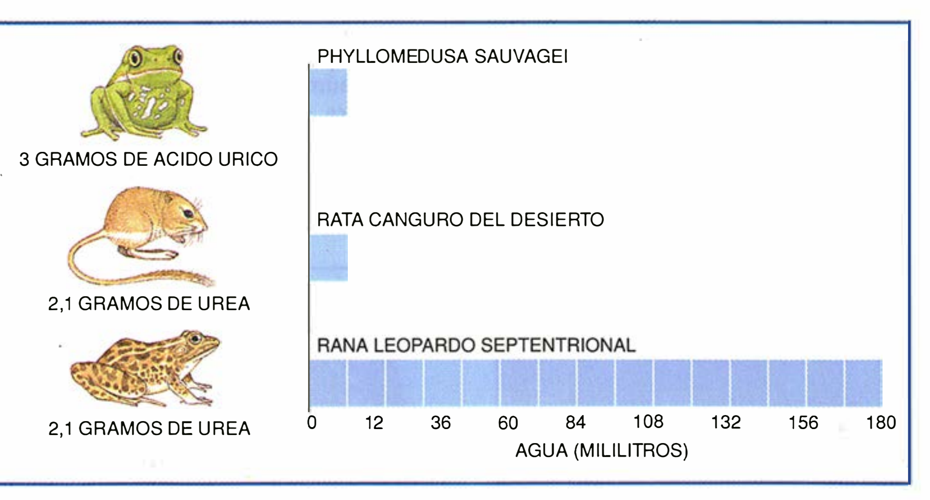
B. punctatus no se limita a escoger un hábitat protector. Posee cierta facultad que le permite abandonar su fuente de agua y andar en busca de insectos durante las cálidas noches veraniegas: puede almacenar el 40 por ciento de su peso corporal en forma de orina diluida. Si agota todas las reservas de la vejiga, echa mano de otro recurso característico: puede tolerar la pérdida de hasta el 40 por ciento de su agua corporal. Por mor de comparación, los seres humanos toleran sólo una pérdida del 10 por ciento del agua corporal; los camellos, del 20 por ciento.

La mayor parte de las regiones del desierto carecen de charcas y cursos de agua permanentes. Los anfibios que viven en tales zonas no se retiran a grietas de las rocas: excavan bajo tierra. El suelo protege a los anuros del calor superficial, extremo durante la estación seca. Recaban agua del subsuelo, y la retienen

Comparación de la excreción de nitrógeno*

La mayoría de los anfibios, así la rana leopardo septentrional, excretan nitrógeno en forma de urea en solución; usan, para ello, gran cantidad de agua. Los mamíferos de los desiertos emplean menos agua para excretar la misma cantidad de urea. Las ranas deserticolas, como *Phyllomedusa sauvagei*, utilizan también poca agua, pero excretan en forma de ácido úrico precipitado los desechos de nitrógeno.

* por gramo de nitrógeno



mientras se seca la tierra porque pierden poca por evaporación.

Estudiamos la ecología de los sapos excavadores en el sudeste de Arizona, donde abundan tres especies de *Scaphiopus*, los sapos de espuelas, fáciles de encontrar cuando los chubascos de verano los sacan de su madriguera. Aunque alguno emerge a la menor llovizna, la mayoría sale al atardecer del primer aguacero fuerte, cuando se forman charcas temporales. ¿Qué señales desencadenaban semejante conducta? Si humedecíamos el suelo suave y silenciosamente, derramando agua, no se producía ninguna respuesta, pero si lo rociábamos a la manera de lluvia, los animales salían a la superficie. Y aparecían aun cuando mantuviéramos seco el suelo interponiendo un plástico. El sonido por sí solo era una señal suficiente.

Una vez que abandonan la madriguera, los adultos se encaminan hacia los charcos para reproducirse. Los ejemplares que recogimos en el camino presentaban, por lo común, el estómago lleno de termes, que simultáneamente han emergido de sus nidos subterráneos. Los sapos de espuelas tienen un apetito notable y pueden consumir el 55 por ciento de su peso corporal en una sola noche. Una comida de termes ricos en lípidos puede proporcionar la energía necesaria para mantener a un sapo durante más de un año, suficiente incluso para permitir que una hembra produzca huevos.

Llegados al agua, suelen permanecer allí unas 24 horas, el tiempo que requieren para aparearse y poner huevos. Se marchan y recorren a veces algunos kilómetros hasta cobijarse en madrigueras superficiales. Durante las noches sin viento buscan comida sobre el suelo del desierto todavía húmedo. Los sapos retornan al nido después de comer, y se vuelven a enterrar en el suelo permeable. A finales del verano desaparecen, para no dejarse ver hasta que se desentierran el estío siguiente. En ciertas regiones del desierto del Colorado se observó que una especie, *Scaphiopus couchii*, sobrevivía tras casi dos años sin lluvia. Esto se explica porque durante su retiro subterráneo el sapo de espuelas reduce drásticamente su tasa metabólica, y le bastan las reservas de grasa.

¿Pueden regular la composición de sus fluidos corporales mientras se encuentran bajo tierra? Para resolver la cuestión, y antes de que llegaran las lluvias, nos aprestamos a localizarlos excavando cerca de los charcos secos donde acudían para reproducirse. Aun cuando empleamos una rasadora mecánica para excavar una amplia superficie, no vimos ninguno. Por suerte, un granjero local nos comentó que él a veces desenterraba sapos cuando cavaba agujeros para los postes de su cerca, algunos a casi un metro de profundidad. Además, los animales desenterrados se hallaban sorprendentemente lejos, a 100 metros, de la charca reseca.

Gracias a esa información acertamos en los lugares de excavación, sacamos algunos ejemplares y los estudiamos. En cierta zona de Arizona, extrajimos sapos a lo largo de distintas épocas del año. Tomamos muestras de sangre y orina y analizamos su contenido en electrolitos, urea y concentración total de solutos. Medimos el volumen de orina en la vejiga y el contenido de humedad del suelo de la madriguera.

Desde septiembre, mes en que se habían enterrado, hasta marzo, cuando los recuperamos, la concentración de solutos en plasma y orina era la típica de anuros completamente hidratados. Además, en marzo la mayoría de los individuos habían retenido gran cantidad de orina diluida en su vejiga, del 25 al 50 por ciento en peso corporal. El suelo que rodeaba a los sapos se hallaba bastante húmedo; las fuerzas que ligaban el agua al suelo eran lo suficientemente débiles para que el animal pudiera absorberla por ósmosis.

A finales de junio, justo antes de las primeras lluvias, los sapos se encontraban todavía en una condición excelente, pero contenían concentraciones elevadas de urea en plasma y en orina. Para entonces, el entorno se había secado tanto que el agua ya no podía pasar del suelo al animal, a menos que la concentración total de solutos en éste hubiera aumentado hasta el punto de contrarrestar las fuerzas intensas que ahora ligaban el agua al suelo.

La acumulación de urea en los fluidos corporales de los sapos de espuelas descompensa este exquisito equilibrio osmótico. Hemos observado, en los análisis de laboratorio, que los sapos producen y almacenan urea según las necesidades. Si se les coloca en suelo relativamente seco, fabrican más urea que cuando están en suelos húmedos. A esa estrategia acumulativa de urea recurren también las ranas que se adaptan a aguas salobres (no hay ranas marinas). En virtud de dicha retención, los fluidos corporales son más concentrados que los fluidos que rodean al animal, y así el agua penetra en éste por ósmosis. No es otra la razón por la que tiburones y celacantos mantienen altas concentraciones de urea en sus fluidos corporales.

Hay sapos excavadores de la familia Ceratofriídos que emplean una táctica de supervivencia aún más refinada que el sapo de espuelas. En vez de acumular urea en los fluidos corporales, dependen de un capullo para evitar la pérdida de agua. Estos





2. CAMBIO DE COLOR de *Chiromantis xerampelina*, cualidad que le permite soportar la insolación directa. Al abandonar su coloración protectora oscura (*izquierda*) y adoptar el color blanco (*derecha*), esta rana arborícola refleja los rayos solares. Para sobrevivir al calor, acumula agua abundante en su vejiga y aprovecha luego esa reserva para el enfriamiento por evaporación.

sapos curiosos habitan en el Gran Chaco, una región semiárida que se extiende desde la Argentina central y septentrional hasta Paraguay, donde viven en charcas temporales que se inundan durante las lluvias de verano. La especie *Lepidobatrachus laevis* es voraz y belicosa. Emite fuertes gritos y muerde cuando se ve amenazada. En guaraní, idioma del Paraguay, se le denomina kururú chiní, "el sapo que chilla".

A diferencia de los sapos de espuelas, los kururúes chiníes permanecen en las charcas durante las épocas de sequía. Conforme avanza el proceso de evaporación, excavan a una profundidad somera hasta quedar enterrados para cuando se ha secado el limo. Los sapos empiezan entonces a producir un capullo de varias capas. El kururú chiní no es el único que acude a esa práctica. Se conocen otras varias especies excavadoras de Australia, Africa y México que forman capullos; según parece, esa estrategia se adquirió varias veces y de manera independiente en el curso de la evolución.

Todos los anuros mudan periódicamente la capa celular más externa de su piel, una vez generada otra capa de sustitución. No se muda, sin embargo, esa capa exterior durante la formación del capullo, y nuevas capas sucesivas se van agregando bajo la misma. El kururú chiní crea una nueva capa cada 24 horas, hasta que se encuentra rodeado por un capullo multicapa de células planas con mucus seco entre capa y capa. Cuando se traza un gráfico de la pérdida de agua por evaporación en función del tiempo durante la formación del capullo, aparece una reducción hiperbólica con cada capa que se genera.

En el laboratorio, el kururú chiní construirá un capullo si se le priva de agua y se le coloca en un lugar tranquilo y oscuro. Filmamos su comportamiento: el sapo sólo se movía, y ligeramente, mientras iba desarrollándose el capullo; a las pocas semanas permanecía inmóvil días enteros. Mas, aun resguardado en su capullo concluido, conservaba su desconcertante capacidad de chillar si se le molestaba. Basta humedecerle levemente con agua para que despierte y se apreste a mudar el capullo entero. Con las patas empuja el capullo desde la parte posterior del cuerpo hasta la cabeza; luego, se come ese encapsulamiento húmedo.

Por puro azar se descubrió lo que tal vez sea la adaptación más singular de los anuros a la vida en el

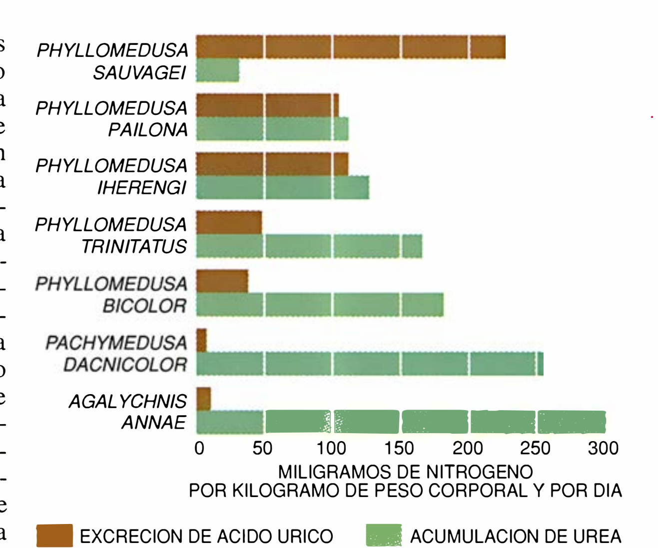




3. ASEO DE LA PIEL en *Phyllomedusa sauvagei*. Se vale de sus cuatro patas; la acción sucesiva de una detrás de otra la recubre por entero de una sustancia cérea que segrega para evitar la pérdida de agua. Terminada la operación, el animal ofrece el aspecto de estar enfundado en plástico. El lípido protector se sintetiza en diminutas glándulas de la piel, que se muestran aumentadas 150 veces y teñidas de rojo en la micrografía de la derecha.

desierto. En 1970 recibimos una separata de un artículo de John P. Loveridge, de la Universidad de Zimbabwe (entonces Rhodesia). Era un trabajo sorprendente. Daba cuenta de ciertos experimentos que demostraban que la rana arborícola gris, *Chiromantis xerampelina*, sobrevivía largos períodos en recintos al aire libre y secos. La rana perdía peso a un ritmo que era una fracción del de otras ranas; su tasa era similar a la de un lagarto mantenido en condiciones similares. Loveridge señalaba que la mayor parte de la masa seca de la orina de la rana correspondía a ácido úrico.

Sus afirmaciones rompían con la verdad establecida, pues se daba por supuesto que todos los sapos y ranas tenían la piel permeable al agua (salvo los excavadores que formaban capullos) y excretaban nitrógeno en forma de urea. La descripción de Loveridge sugería una rana con piel impermeable, propia de un reptil, y con capacidad reptiliana de excretar ácido úrico.



4. AMPLIA VARIACION de la producción de ácido úrico. Las ranas de regiones áridas, sírvanos de ejemplo *P. sauvagei*, convierten el 80 por ciento de sus desechos nitrogenados en ácido úrico semisólido; gracias a ello, reducen el nivel de urea en sangre y ahorran agua. Las ranas tropicales, como *P. bicolor*, convierten el 20 por ciento. (*Pachymedusa dacnicolor* y *Agalychnis annae* son parientes próximos de *Phyllomedusa*.)

Por la época en que apareció el artículo estábamos empezando a estudiar los anfibios del Gran Chaco. Estábamos maravillados ante la diversidad reinante entre la fauna anfibia de la región, en particular con *Phyllomedusa sauvagei*, arborícola, la rana verde de los lugareños. Mientras que la mayoría de las ranas de zonas áridas deben esconderse bajo tierra o permanecer cerca del agua, excepto durante la estación de las lluvias, *Phyllomedusa* y *Chiromantis* se refugian en los árboles, donde hallan alimento. *P. sauvagei* se muestra activa antes del inicio de las lluvias estivales en Paraguay; y podemos encontrarnos con *Chiromantis* durante la estación seca en Zimbabwe. Instigados por el trabajo de Loveridge, medimos en el laboratorio, y sin excesivo refinamiento, la pérdida de agua en *P. sauvagei*; no observamos nada que llamara la atención.

Transcurridas algunas semanas, mientras la manipulábamos, una rana evacuó un respetable burujo de orina semisólida. Sin tardar analizamos una muestra en el espectrofotómetro y comprobamos que tenía, por principal componente, ácido úrico. La investigación relativa al balance de nitrógeno en *Phyllomedusa* y *Chiromantis* ha confirmado las ventajas que reporta la excreción de ácido úrico. En ambas especies, alrededor del 80 por ciento del nitrógeno de desecho se emite como ácido úrico o sales de urato. Sodio y potasio precipitan junto con el ácido úrico, lo que redobla la capacidad excretora de los riñones. En consecuencia, tales ranas pueden alimentarse aunque pasen largos períodos privadas de agua. Parece variar bastante, de una especie a otra, la capacidad sintetizadora de ácido úrico: desde 230 miligramos por kilogramo y día en *P. sauvagei* hasta 40 miligramos por kilogramo y día en *P. bicolor*, que habita en zonas tropicales del Brasil.

Hallamos que la capacidad de fabricar y excretar ácido úrico constituía sólo un aspecto de las adaptaciones de la rana. Volvimos a medir la pérdida evaporativa de agua en *Phyllomedusa* (esta vez con cuidado y paciencia) y encontramos que *Phyllomedusa*, lo mismo que *Chiromantis*, podía limitar su pérdida de agua hasta niveles mínimos si la dejábamos posarse y comportarse a sus anchas.

Habíamos observado que la rana verde empleaba sus patas, en sucesión, para asear su cuerpo. Terminado el ritual, ofrecía un aspecto como si estuviera hecha de plástico: el agua que salpicara su piel formaba gotitas, como ocurre sobre una superficie encerada. Los estudios histológicos revelaron la presencia en la piel de una nueva clase de glándulas, que se esparcían entre las glándulas mucosas y las glándulas venenosas que caracterizan a las ranas. Las glándulas, diminutas y numerosas, suman unas 30 por milímetro cuadrado de piel; se tiñen intensamente al tratarlas con colorantes liposolubles. Sabemos ahora que el proceso de impermeabilización implica la descarga sincrónica de estas glándulas, seguida inmediatamente por la limpieza. El revestimiento, una mezcla bastante heterogénea de lípidos, consta, sobre todo, de un éster de parafina. Al igual que *Phyllomedusa*, insectos y plantas emplean ceras diversas para frenar la pérdida de agua. Curiosamente, *Chiromantis* no posee glándulas lipídicas, y seguimos ignorando el mecanismo del que se vale para evitar la evaporación.

Phyllomedusa y *Chiromantis* toleran ambientes muy cálidos, hazaña que logran controlando la temperatura corporal. Antes de la llegada de las lluvias estivales, la temperatura ambiente puede superar los 40 grados C. Comprobamos que la temperatura corporal de *P. sauvagei* se acompasaba a la temperatura ambiente, salvo durante la parte más cálida de los días tórridos; entonces, las ranas permanecían a unos 40 grados C, de dos a cuatro grados por debajo de la temperatura externa y de tres a cinco grados menos que la temperatura registrada por un modelo de termómetro construido para remedar el tamaño, la forma y las características de absorción de la rana.

Las ranas consiguen esta termorregulación mediante el control de las tasas de evaporación. Se ha demostrado en el laboratorio que compensan el aumento de calor ambiente con pérdidas térmicas por evaporación, y ello en una amplia gama de temperaturas, velocidades del viento y humedades relativas. El mecanismo se parece al de la sudoración. Observada al microscopio, la piel muestra descargas periódicas, procedentes de muchos de los conductos glandulares que la tachonan, cuya última responsabilidad nosotros atribuimos, aunque sin pruebas definitivas, a las glándulas mucosas. A tenor de las investigaciones farmacológicas realizadas sobre *Chiromantis*, las glándulas están controladas por nervios simpáticos que estimulan receptores beta-adrenérgicos.

La demanda de la mayor cantidad de agua requerida por la regulación de la temperatura corporal llega con el período seco, en la vigilia de las

lluvias estivales. Las ranas salvan el problema con su tolerancia de altas temperaturas corporales. La mayoría de los días no necesitan evaporar agua por mor de la termorregulación; en los días muy cálidos se requiere termorregulación durante sólo unas horas.

Igual que otras ranas, *Phyllomedusa* y *Chiromantis* acumulan agua en la vejiga y la aprovechan para contrarrestar su pérdida por evaporación. Cuando han agotado las reservas de la vejiga, dejan que la temperatura del cuerpo alcance niveles todavía más elevados y así necesitan menos enfriamiento evaporativo. *Phyllomedusa* pasa la mayor parte del día a la sombra, encaramada en el árbol; a *Chiromantis* la encontramos posada a pleno sol. Para amortiguar ésta los efectos de la radiación solar, sufre un espectacular cambio de color: abandona su coloración protectora gris o parda y, tornándose blanca, refleja la luz solar.

¿Aprovechaba *Phyllomedusa* las débiles lluvias que solían anunciar un fuerte aguacero? Era evidente que su piel impermeabilizada le impedía absorber directamente la humedad. Decidimos acometer algunos ensayos en los que el agua goteaba sobre su cabeza. Ante nuestra sorpresa, la rana levantaba la cabeza y se tragaba las gotas. Al teñir el agua del ensayo con colorantes incapaces de difundirse a través de la piel, vimos su presencia en el esófago, el estómago y el intestino delgado: sin la menor duda, el agua había sido ingerida, no absorbida. Que sepamos, *Phyllomedusa* es el único anuro que bebe.

El estudio de los anfibios en los desiertos y las regiones semiáridas ha revelado adaptaciones especializadas, de largo alcance y diversidad, para la vida en tierra firme. La imagen que se está configurando de la fisiología de los anuros desafía el estereotipo basado en los estudios iniciales sobre especies de zonas templadas. De forma paralela, los anfibios de otros hábitats poseen facultades peculiares (como la tolerancia a la congelación) que eran desconocidas hasta hace poco [véase "Congelados y vivos", de Kenneth B. Storey y Janet M. Storey; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1991]. Pese a tamaña diversidad, o quizá debido a ella, existen pruebas de una reducción mundial de unas poblaciones de anfibios y de la extinción de otras. La caída no se limita a un hábitat determinado.

En algunos casos se ve clara la intervención del hombre. Lugares que antaño eran el hogar de sapos de espuelas en California del sur se han transformado en zonas residenciales. Hemos asistido a una destrucción generalizada del hábitat de *Phyllomedusa* en el Gran Chaco, donde se cortan árboles para combustible. La contaminación del aire y del agua, la introducción de peces depredadores e incluso el consumo de ancas de rana contribuyen a su desaparición. A veces, es el hombre quien promueve la supervivencia. La abundancia de sapos de espuelas en el sudoeste de Arizona se debe probablemente a la creación de numerosos estanques para el ganado construidos para captar la escorrentía de los aguaceros. Estas instalaciones sirven de lugares de cría.

Pero las poblaciones de anuros han ido mermando y desapareciendo de sitios protegidos o apenas alterados. Aunque esas bajas obedezcan, en parte, a fluctuaciones naturales verosímiles, crece la preocupación de que la reducción en el número de anfibios refleje un sutil deterioro ambiental de escala global. Los ciclos biológicos complejos de los anfibios y sus especializaciones reproductivas pueden hacerlos doblemente sensibles. Las especies adaptadas a los desiertos no parecen soportar mejor los efectos de las actividades humanas que sus parientes de zonas húmedas. Hasta los animales que pasan la mayor parte del año enterrados deben encontrar alimento abundante y lugares acuáticos adecuados para reproducirse cuando emergen. Para frenar los procesos de extinción, se hace imprescindible conocer los diversos mecanismos de que se valen ranas y sapos para medrar en todos los hábitats, así como sus limitaciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BEHAVIOR AND THERMAL RELATIONS OF THE ARBOREAL FROG *PHYLLOMEDUSA SAUVAGEI*. Lon L. McClanahan y Vaughan H. Shoemaker en *National Geographic Research*, volumen 3, n.º 1, páginas 11-21; invierno 1987.

PHYSIOLOGICAL ECOLOGY OF AMPHIBIANS IN ARID ENVIRONMENTS. Vaughan H. Shoemaker en *Journal of Arid Environments*, n.º 14, vol. 2, páginas 145-153; marzo de 1988.

EXCHANGE OF WATER, IONS, AND RESPIRATORY GASES IN TERRESTRIAL AMPHIBIANS. Vaughan H. Shoemaker, con Stanley S. Hillman, Stanley D. Hillyard, Donald C. Jackson, Lon L. McClanahan, Philip C. Withers y Mark L. Wygoda en *Environmental Physiology of the Amphibians*. Dirigido por Martin E. Feder y Warren W. Burggren. University of Chicago Press, 1992.

PIRATERIA ELECTRONICA

Paul Wallich

Algún día, Internet será la superautopista de la información. Hoy, evoca la metáfora del ferrocarril decimonónico resoplando hacia el Oeste por praderas azarosas. Las oleadas de nuevos colonos que invaden el espacio cibernético en busca de informaciones u oportunidades comerciales, se convierten en presa fácil de avispados que manejan el teclado con la misma destreza con que Billy el Niño desenfundaba el revólver. Los veteranos de la frontera electrónica se lamentan de la ola de criminalidad en ascenso y del deterioro de las normas de colaboración asentadas en una tradición muy sólida.

Es difícil apreciar hasta qué punto Internet depende de la responsabilidad compartida y respeto mutuo. Las 30.000 redes con más de 2,5 millones de ordenadores conectados que componen el sistema se intercambian gigabytes de información sin más requisitos que un sencillo protocolo digital de saludo. (Hasta para estimar el tamaño de Internet, como lo hace SRI International, se necesita la cooperación de los administradores de sistemas en todo el mundo.) Muchos, por ejemplo, saben



1. LOS HABITANTES del ciberespacio pueden ser villanos, víctimas o espectadores (algunos de ellos se simbolizan a la derecha). La autodefensa es difícil en un entorno donde impera la confianza.

1. USUARIOS
2. SALTEADOR
3. MAGO
4. GURU
5. ARDILLA
6. ALBERTO
7. VERONICA
8. TELARAÑA MUNDIAL
9. MOSAICO
10. TRAER
11. DUENDE RELOJ
12. DUENDE DACTILAR
13. DUENDE FTP (PROTOCOLO DE TRANS. DE FICHEROS)
14. DUENDE TELNET
15. DUENDE CORREO
16. RAIZ
17. NADIE
18. PROGRAMAS ZOMBI
19. SATANAS
20. ROBO
21. GUSANO
22. POLICIAS
23. ALAMBRADA
24. CABALLO TROYANO
25. HUSMEADOR DE PAQUETES
26. FICHEROS DE PUNTOS (DOT)
27. FICHEROS DE DISPOSITIVO
28. CAPSULAS
29. SIST. DE FICHEROS DE RED (N

Usuarios y fabricantes se han echado a la autopista de la información. Allí les aguardan bandidos electrónicos y otros hampones

30. SERVIDOR DE NOMBRE DE DOMINIO
31. DUENDE IDENT
32. DUENDE INTERNET
33. DUENDE REGISTRO (LOGIN)
34. DUENDE NFS
35. DUENDE PAGINAS
36. DUENDE AUTORIZACION-DE-CONTRASEÑA
37. DUENDE CITAS
38. DUENDE REMOTE-LOGIN
39. DUENDE STAT
40. DUENDE CAMBALACHE
41. DUENDE SYSLOG
42. DUENDE ACTUALIZAR
43. DUENDE USENET NEWS
44. PIRATA DACTILAR
45. MIRON
46. CLONICOS DE TELEFONO CELULAR
47. LLAMADA DE PROC. REMOTO
48. GALLETAS MAGICAS
49. GUIONES DE CAPSULA
50. FILTRO
51. IMITADOR
52. CORTAFUEGO
53. ENRUTADOR
54. SISTEMA DE RESPUESTA AL RETO
55. CANCERBEROS

FS)

que los mensajes de correo electrónico pueden ser leídos por gente que no son sus destinatarios, pero pocos saben que es posible falsificar estos y otros mensajes sin dejar rastro. Casi nadie que reciba un mensaje puede estar seguro de que proceda de su aparente expedidor.

Los suplantadores electrónicos pueden difamar o incitar al crimen en nombre de otra persona; incluso disfrazarse de colega amigo para persuadir a alguien a que revele información delicada personal o profesional. Y si pocos saben lo suficiente para preocuparse por las falsificaciones electrónicas, todavía muchos menos comprenden que un mensaje alevosamente codificado y cursado a ciertos ordenadores pueda dar un acceso casi ilimitado a todos los ficheros del destinatario. Pero los programas de transferencia de correo no son sino una de las numerosas vías por las que un agresor irrumpe en un ordenador conectado en red. "Es la ley del Oeste", bromea Donn B. Parker de SRI: "Sólo rigen el rápido crecimiento y la aventura. O disparas el primero, o eres hombre muerto."

Para comprender cómo llegó a esta situación Internet, en la cual se han cifrado tantas esperanzas en materia de educación, beneficios y competitividad internacional, resulta instructivo examinar el historial de seguridad de otras áreas de la infraestructura internacional de las

comunicaciones. Un "salteador" ("cracker") de ordenadores puede convertirse en "genio" ("phreak") del teléfono para no pagar por las intrusiones en ordenadores remotos. O bien tomar la fechoría telefónica como una afición conexa (a modo de quien ejerce a la vez la caza y la pesca furtivas). No solamente varios de los actores son los mismos, sino que también coinciden muchos aspectos del tratamiento. Por si fuera poco, los que diseñan una generación nueva de tecnología caen en los errores cometidos por sus predecesores.

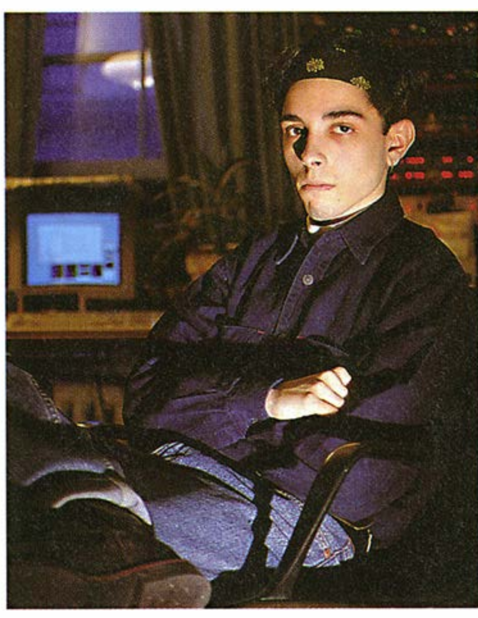
Así, se empecinan en seguir la vieja táctica de "a la seguridad por la oscuridad". Siempre han fallado los intentos de mantener seguro un sistema guardando en secreto sus puntos vulnerables. Nos lo ilustra la guerra entablada entre las compañías telefónicas y los "genios de la cabina"; la más sonada protagonizada por AT&T: los "genios" podían manipular la red de larga distancia, y hacían llamadas telefónicas gratis sin más que tocar ciertos tonos junto al receptor del teléfono. Las frecuencias exactas estaban "escondidas" en manuales técnicos y oscuros artículos de revistas, pero lograron desentrañarlas. Construyeron las llamadas cajas negras, azules y rojas para producir las señales deseadas, floreciendo así una pequeña industria casera hasta que la compañía implantó métodos en los que el microteléfono no se dejaba engañar tan fácilmente.

Los números de la tarjeta de crédito se componían de una serie de dígitos (código de zona, número y código de la central de facturación) seguidos por un "dígito de comprobación" que dependía de los anteriores. La entidad explotadora realizaba la operación matemática que comprobaba la validez de un número concreto de tarjeta de crédito. Y para los "genios" no era demasiado problema generar el dígito de comprobación correspondiente a cada número de teléfono. La compañía tenía que confiar en detectar las llamadas fraudulentas que se produjeran, conseguir localizar a los "genios" y denunciarlos judicialmente. A la larga esta táctica nunca dio buen resultado.

En 1982, AT&T introdujo un procedimiento más seguro. A cada tarjeta se le asignaron cuatro dígitos de comprobación (el "PIN", de *personal identification number*) que no eran fácilmente calculables a partir de los 10 dígitos anteriores. Para determinar la validez de la tarjeta, el personal de explotación consultaba en directo una base de datos de ámbito nacional. Desde entonces, el hurto de números de tarjetas de crédito es cuestión de espionaje y de astucia. En estaciones de ferrocarril, vestíbulos de hoteles y aeropuertos no es raro ver a "mirones" que avizoran por encima del hombro de su vecino el número de tarjeta que éste teclea, y luego lo aprovechan en su beneficio. Los robos de tarjetas de crédito cuestan a las compañías de telecomunicaciones y a sus clientes del orden de 70.000 millones de pesetas al año. El Servicio Secreto de EE.UU. ha valorado en unos 350.000 millones de pesetas el volumen de fraude total en las telecomunicaciones, mientras que las estimaciones de la industria varían entre 150.000 millones y más del billón de pesetas.

"Sólo es inseguro cuando está mal configurado."

—Mark Abene, alias "Phibra óptica", pirata de ordenador



El problema ajeno

En el transcurso de una generación, AT&T desarrolló instrumentos de observación para desbaratar los intentos de evadir la tasación de llamadas interurbanas. También los utilizó para anular a los que pretendían manipular los servicios especiales marcando el sistema de conmutación. Tal acceso permitía a los "genios" cambiar los teléfonos de otras personas a nuevas localidades, enrutar llamadas alrededor del mundo o incluso cortarse el servicio unos a otros. Al desintegrarse el sistema Bell en 1984, sin embargo, AT&T dejó de ser el policía mundial de las telecomunicaciones. En particular, las decenas de miles de compañías grandes y pequeñas que compraron PBX (centralitas privadas automáticas) para automatizar sus redes telefónicas internas se convirtieron en el blanco de los "piratas dactilares" ("finger hackers"), pero careciendo de la experiencia técnica de AT&T para protegerse de sus ataques.

Según Kevin Hanley, de AT&T, el modo más sencillo (en los Estados Unidos) de hacer llamadas fraudulentas consiste en marcar 1-800 (prefijo de llamadas a números gratuitos) más siete cifras. Al otro extremo de muchas líneas exentas de tasación hay una unidad de acceso remoto a PBX, que permite a los empleados de esa compañía llamar (sin cargo) a su oficina central, y desde ella marcar cualquier número del mundo. La mayoría de estas unidades requieren un código de seguridad para las llamadas salientes, pero, como dice Hanley, "a veces el presidente no quiere tener que recordar una contraseña". Nadie conoce con exactitud el coste de tal autoindulgencia, pero se estima que el fraude de las PBX podría situarse entre las decenas y los cientos de miles de millones de pesetas al año. "Es un delito estúpido", rezonga Mark Abene, conocido "pirata" que ahora cumple una condena de un año en prisión federal por intrusión informática.

Pese a todo, las incesantes tentativas de marcación fraudulenta son rentables. Los piratas de la informática pueden ganar mucho dinero en llamadas antes de ser descubiertos. La mayoría de estos delitos son cometidos por grupos organizados que incluso llegan a montar tiendas donde venden las llamadas interurbanas a precios rebajados. Otros, menos cuidadosos de la imagen, venden las llamadas desde una cabina telefónica poco vigilada.

Pueden evitarse casi todos estos ataques configurando el sistema para que bloquee las llamadas dirigidas a localidades donde la compañía no realiza actividades, y registrando todas las llamadas entrantes para detectar los intentos de intrusión. No obstante, hay muchos propietarios de PBX que ignoran el peligro que corren. Y entre los que son conscientes del riesgo, se dan casos de dejar desatendida la instalación por la noche o

en los fines de semana, que es cuando se producen la mayoría de los fraudes.

Los que concibieron la siguiente gran innovación de las telecomunicaciones, la telefonía celular, parecían ignorar la lección tan penosamente aprendida por sus predecesores alámbricos. Aparte de que puede escuchar las conversaciones cualquiera que disponga del receptor de radio apropiado, las estaciones móviles son especialmente vulnerables al fraude de tasación. Toda llamada de un teléfono celular comienza emitiendo el número de orden y el número de facturación del teléfono. Las centrales de conmutación celular contrastan este par de números con una base de datos de teléfonos operativos para decidir si puede darse curso a la llamada. Por desgracia, esos números contienen todo lo que el ladrón necesita saber para suplantar a un legítimo abonado llamante.

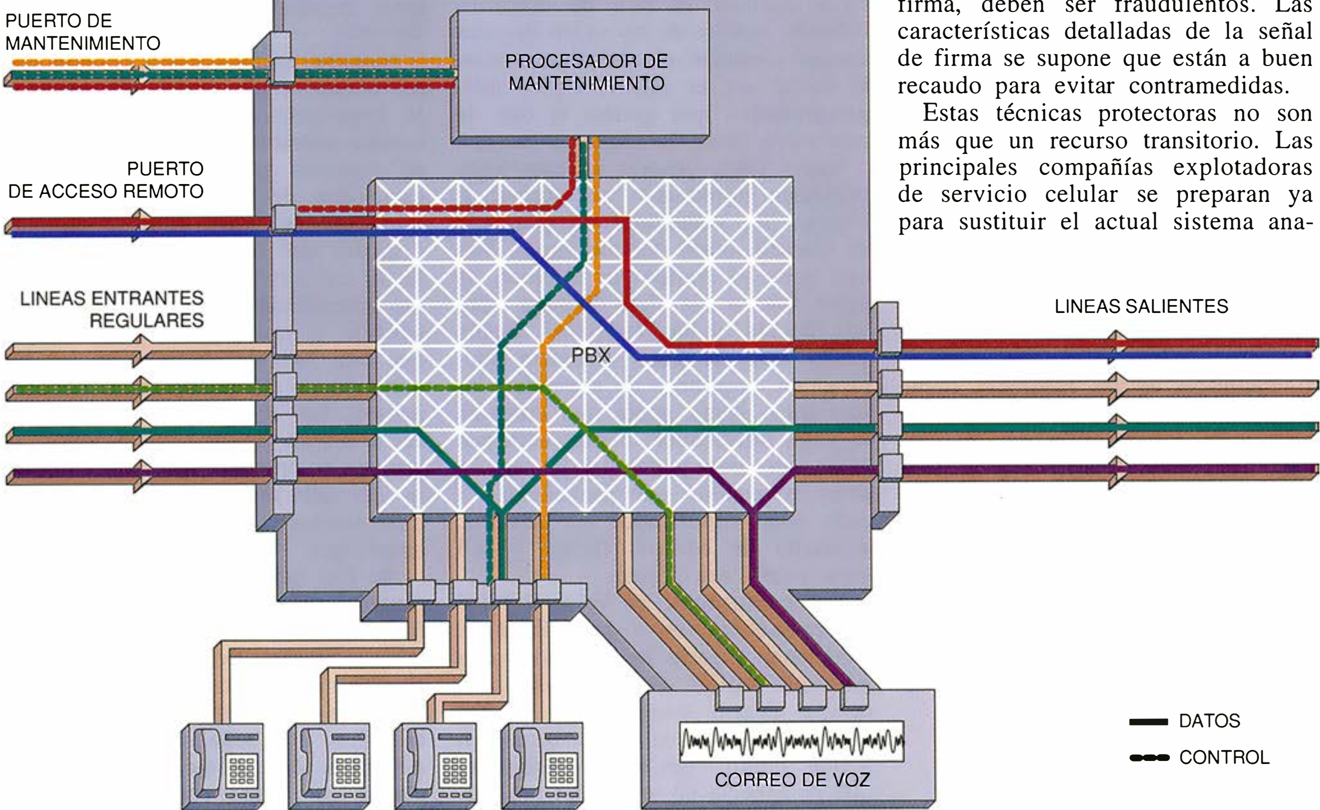
Ya en 1984, Geoffrey S. Goodfellow señalaba posibles caminos hacia el fraude celular, pero hasta el año pasado no aparecieron casos de utilización de los artificiosos esquemas previstos. Para Goodfellow, el problema fundamental era que los diseñadores de la telefonía celular infravaloraban tanto la pericia técnica como la perseverancia de los que pretenden trastornar sus equipos. Pidió sin éxito que se sustituyeran las actuales normas de telefonía celular por otras con mayor seguridad.

El modo más sencillo de ataque puede llamarse clonación, y consiste en reprogramar el número de orden y el número telefónico de un aparato pirata para convertirlo en el de un teléfono que tenga en uso un abonado legítimo. Aunque las normas dictan que ha de ser imposible cambiar el número de orden sin causar un daño irreparable, hubo al principio fabricantes de teléfonos celulares que suministraban esos números en una pastilla de memoria desmontable con un destornillador. Otros sitúan ahora esa información en una pastilla eléctricamente programable, a la que puede accederse sin más que aplicar al teléfono la tensión eléctrica adecuada.

Se producen fraudes más refinados basados en utilizar los mismos circuitos que permiten al teléfono celular escuchar las llamadas entrantes, adaptados para decodificar los números a medida que se van emitiendo. El malhechor podrá repetir esos números para hacer llamadas que serán facturadas a terceros inocentes. Las compañías que cursan tráfico de telefonía celular han adoptado diversas técnicas de vigilancia para detectar llamadas ilícitas. Algunas de ellas, además, han preparado sus equipos de conmutación de manera que rechacen el tráfico celular de larga distancia a zonas del mundo que suelen ser destino de tales llamadas.

En vez de limitarse a observar configuraciones de llamada, los ingenieros de telecomunicaciones han estado ensayando circuitos que pudieran bloquear el enorme volumen de llamadas celulares fraudulentas. En el otoño de 1993, TRW anunció una técnica para analizar la "firma" recibida por transmisión analógica de cada teléfono, y almacenarla junto con el número de orden y el número telefónico. Si el número de orden de una estación móvil y el número telefónico no corresponden con dicha firma, deben ser fraudulentos. Las características detalladas de la señal de firma se supone que están a buen recaudo para evitar contramedidas.

Estas técnicas protectoras no son más que un recurso transitorio. Las principales compañías explotadoras de servicio celular se preparan ya para sustituir el actual sistema ana-



2. LOS SISTEMAS TELEFONICOS tienen muchos puntos vulnerables. Los "piratas dactilares" marcan un puerto de acceso remoto de una PBX y emplean un código de seguridad para hacer llamadas fraudulentas (*azul*), o bien engañar a un sistema de correo de voz para que los transfiera a una línea externa (*morado*). Se puede inducir al correo de voz para que divulgue su contenido, transmita mensajes no autorizados o destruya datos almacenados. Los agresores también pueden marcar un puerto de mantenimiento de la PBX para desactivar la seguridad del puerto de acceso remoto (*rojo*), enviar llamadas a números del exterior (*verde*) o reconfigurar de otro modo el sistema.

lógico por otro de tipo digital. En la mayoría de las normas de telefonía celular digital se incorporan protocolos según los cuales un teléfono que origina una llamada debe responder a un acertijo matemático basado en su número de orden y número telefónico, en vez de descubrir abiertamente este par de números. Ciertas estaciones tienen también medios para cifrar las conversaciones con el fin de impedir la escucha furtiva. Por otra parte, la facilidad de cifrado ha inducido a los gobiernos a prohibir la venta de estos equipos.

En los mismos años en que las compañías telefónicas luchaban contra los genios del robo y los arquitectos de la telefonía celular daban pie a un gigantesco fraude anual para los usuarios y proveedores de servicio, los expertos sentaban los fundamentos de la Internet. Si bien su financiación inicial provenía de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada del Departamento de Defensa (DARPA, en siglas inglesas), la seguridad no era realmente un motivo de preocupación, como recuerda David J. Farber, de ARPAnet y hoy en la Universidad de Pennsylvania. En los primeros días, sólo tenían acceso a la red los investigadores, que compartían objetivos y principios éticos comunes, señala Eugene H. Spafford, de la Universidad Purdue.

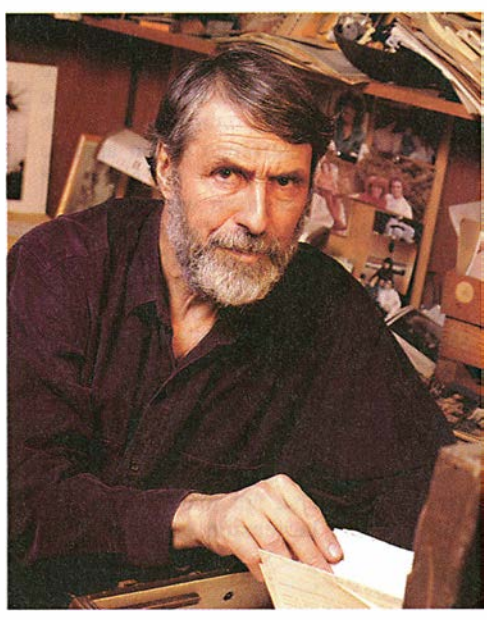
La propia naturaleza de las transmisiones Internet encarna esta mentalidad: los paquetes de datos son transmitidos por sucesivos enlaces de la red, de un ordenador a otro, hasta que llegan a su destino. Un paquete podría pasar por doce o más tramos, y cualquiera de las máquinas intermedias leer su contenido. Y por si fuera poco, muchos paquetes Internet inician su viaje en una red de área local (LAN, *local area network*), donde la intimidad está todavía más desprotegida. En una LAN típica, los ordenadores difunden cada mensaje a todos los demás conectados a la red. Solamente un pacto entre caballeros asegura al expedidor que nadie más que el destinatario va a leer su mensaje.

Deterioro de la buena vecindad cibernética

La falta de seguridad de ARPAnet no preocupó a nadie porque se daba por supuesta la honorabilidad de todos, según Dorothy E. Denning, de la Universidad de Georgetown. Sin embargo, al ir creciendo Internet empezó a cambiar el tipo de usuarios. Además, muchos de los recién llegados apenas conocían el complejo contrato social —y el soporte lógico temperamental— que guiaba el uso de esta maravillosa herramienta nueva.

"Los salteadores van por delante de los administradores legítimos; muy por delante de todos los demás."

—Peter G. Neumann, SRI



Hacia 1988, cuando un canallesco programa introducido por Robert J. Morris, Jr., estudiante de posgrado en Cornell, cortó durante varios días casi todo el tráfico de Internet, se había abierto una clara división entre los "doctos" y los "indoctos". Según Willis Ware, de Rand, verdadera autoridad en cuestiones de seguridad informática, había gente que entendía la jerga informática, comprendía qué había sucedido y de qué manera, y otros en cambio que preguntaban a cada paso significados de palabras, situación de códigos fuente y mil otras cuestiones básicas.

Desde entonces, la vulnerabilidad de Internet ha ido a peor. Peter G. Neumann, experto en seguridad que edita el RISKS Forum —continuo debate abierto sobre puntos débiles del ordenador—, califica la situación actual como "pésima". Cualquiera que se agencie un ordenador, un modem y se gaste una módica cantidad mensual puede obtener un enlace directo a Internet, y tanto ser presa de irrupciones ajenas como lanzar agresiones contra otros usuarios. Hace pocos años en la guía predominaban nombres reputadísimos, como "mit.edu", "stanford.edu" o "ibm.com", mientras que hoy abundan nombres sin la menor resonancia pública.

Además, al convertirse Internet en una entidad mundial, las leyes estadounidenses se quedan relegadas a meras ordenanzas locales. En los Países Bajos, por ejemplo, la intrusión en un ordenador no es necesariamente un delito. Se da el caso de profesores de informática que asignan a sus alumnos posiciones en Internet para acceder a ciertos ficheros y presentarlos luego como prueba de que han entendido los protocolos implicados.

No deja de ser irónico el que cuanto más informatizada y retificada esté una organización, más peligro correrá cuando realice sus primeras conexiones con el mundo exterior. La red interna de una compañía de alta tecnología puede parecerse mucho a la ARPAnet de los viejos tiempos: docenas o hasta cientos de usuarios compartiendo libremente la información y utilizando los datos almacenados en unos pocos servidores de archivos centralizados, sin preocuparse siquiera de qué estación de trabajo están empleando para acceder a sus ficheros.

Mientras se mantengan aislados estos idílicos enclaves del ciberespacio, la despreocupación por la seguridad resulta tolerable. Los administradores de sistemas pueden configurar sus estaciones de trabajo para la libre interconexión entre ellas, e incluso disponer que el sistema de ficheros de la red exporte los directorios de uso generalizado al "mundo" —lo que permite a cualquiera leerlos—, ya que este "mundo" termina en los límites de su red corporativa. Por supuesto, las compañías informáticas acostumbran enviar sus equipos y programas preconfigurados de manera que cada máquina comparta automáticamente sus recursos con sus homólogas.

No hay que ser adivino para imaginar lo que sucede cuando este confiado entorno abre sus puertas digitales a Internet. De repente, "mundo" significa el planeta entero, y cuando se habla de cualquier ordenador de la red se está señalando a cualquier ordenador de *cualquier* red. Los ficheros que antes eran accesibles a los colegas de otros departamentos pueden ahora ser alcanzados desde Finlandia o las Islas Fidji. El camino particular se ha convertido en una autopista abierta a todo el tráfico que sea capaz de soportar.

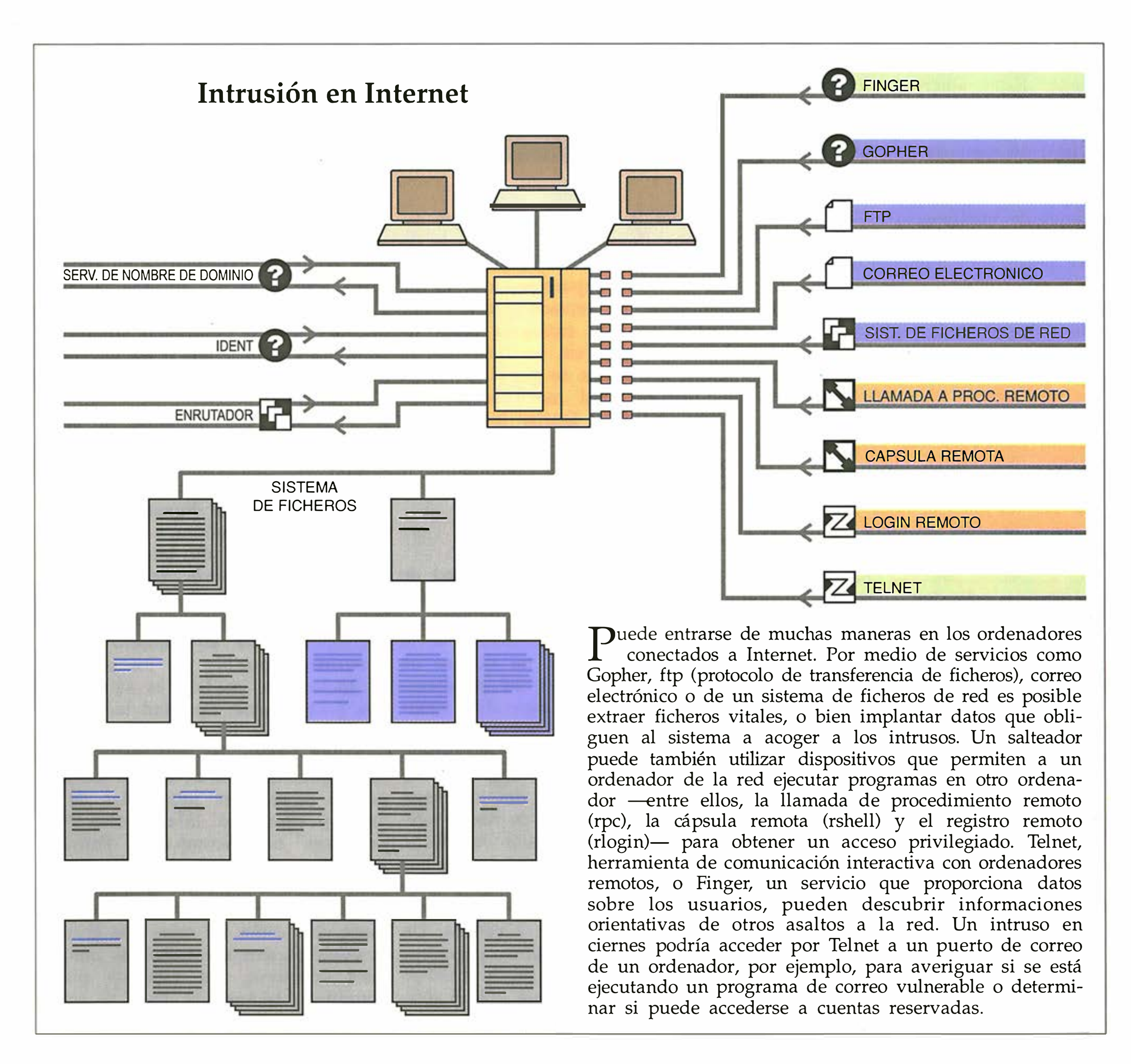
Hasta en los dominios más respe-

tados de Internet pueden encontrarse ordenadores abiertos a todos los visitantes, algo así como si se deja un coche sin nadie y con el motor en marcha. Ilustra este punto una reciente llamada de alerta del CERT (*Computer Emergency Response Team*, grupo de respuesta de emergencia informática), organismo dependiente de la Universidad Carnegie Mellon, donde se debaten los problemas que afectan a la seguridad. Se informa en este trabajo que todas las estaciones de trabajo de Sun Microsystems con micrófono incorporado han sido preprogramadas para dar el estado de "lectura mundial" a su entrada de audio: cualquiera que acceda a una de esas estaciones a través de la red podría escuchar las conversaciones a su alrededor.

Asimismo se advirtió de que también podrían estar programadas en el estado de "lectura mundial" las memorias tampón que almacenan las imágenes visualizadas en las pantallas de las estaciones, al igual que las que guardan los caracteres introducidos por el teclado. Los agresores esperan que alguien se registre en un ordenador para acceder a una cuenta reservada, y después leen la contraseña tomada de la memoria de dicho ordenador. Una vez que los intrusos han conseguido este acceso "raíz", pueden disfrazarse de un usuario legítimo cualquiera y leer, alterar o suprimir los ficheros que les dé la gana. También pueden instalar programas que les ayuden a invadir otros ordenadores e incluso a modificar los registros del sistema para borrar las huellas de su intrusión.

Aun cuando los que se incorporan a la red traten de proteger sus sistemas, no siempre encuentran con facilidad la información que necesitan. Los suministradores de dispositivos y programas informáticos suelen ser reacios a hablar de problemas de seguridad. Y el CERT por lo general no emite sus recomendaciones para toda la red hasta que los fabricantes no han desarrollado alguna solución definitiva, quizá semanas o meses después, o a veces nunca. La mayoría de estas recomendaciones no explican el fallo concreto de la seguridad, sino que citan los programas y dispositivos implicados y especifican las modificaciones que han de efectuarse para reducir el riesgo de intrusión.

Este modo de proceder mantiene la información potencialmente útil



Puede entrarse de muchas maneras en los ordenadores conectados a Internet. Por medio de servicios como Gopher, ftp (protocolo de transferencia de ficheros), correo electrónico o de un sistema de ficheros de red es posible extraer ficheros vitales, o bien implantar datos que obliguen al sistema a acoger a los intrusos. Un salteador puede también utilizar dispositivos que permiten a un ordenador de la red ejecutar programas en otro ordenador —entre ellos, la llamada de procedimiento remoto (rpc), la cápsula remota (rshell) y el registro remoto (rlogin)— para obtener un acceso privilegiado. Telnet, herramienta de comunicación interactiva con ordenadores remotos, o Finger, un servicio que proporciona datos sobre los usuarios, pueden descubrir informaciones orientativas de otros asaltos a la red. Un intruso en ciernes podría acceder por Telnet a un puerto de correo de un ordenador, por ejemplo, para averiguar si se está ejecutando un programa de correo vulnerable o determinar si puede accederse a cuentas reservadas.

fuera del alcance de aquellos salteadores que no estén muy en contacto con el hampa informática. Pero por otra parte tiene en tinieblas a muchos administradores de sistema noveles. Según Neumann, todavía quedan por reconocer abiertamente entre la mitad y las tres cuartas partes de los agujeros de seguridad que hoy dominan los piratas. "La gente no conoce los riesgos", comenta Spafford. "Solamente sabe las ventajas, porque todo el mundo habla de ellas."

Muchas de estas ventajas proceden de programas como Gopher (ardilla), World-Wide Web (telaraña mundial) o Mosaic (mosaico), que ayudan al usuario a navegar por el ciberespacio en busca de información. Una sola selección de menú o un clic de ratón pueden transportar al investigador desde un ordenador en Minnesota a otro situado en Melbourne o en Zurich. Están abiertos a consulta ficheros que contienen datos censales de EE.UU., imágenes de la instalación sanitaria de popa en el transbordador espacial, listas de las tabernas inglesas o de los programas de inteligencia artificial. Estas y otras muchas herramientas, que hace pocos años hubieran deslumbrado a un experto, atraen decenas de miles de nuevos usuarios a Internet. Sin embargo, esta rápida evolución ha pasado por alto etapas que podían haber contribuido a la seguridad. Spafford señala que los espías se apoyan en "la primera o la segunda versión" de programas originalmente escritos para probar ideas.

El popular programa Gopher, según las recomendaciones del CERT y otras fuentes, presenta fallos de seguridad que le permiten acceder no sólo a ficheros públicos sino también a ficheros privados. "Es inseguro sólo cuando está mal configurado", insiste Abene, que cuando salga de la cárcel volverá a ser administrador de un servicio en directo en Nueva York. El Gopher en ejecución inicia un diálogo entre un programa cliente residente en la máquina del usuario y un servidor Gopher situado en cualquier parte de Internet. El servidor presenta al cliente un menú de opciones para información, junto con un juego de "galletas mágicas" (especificaciones abreviadas para localizar información adicional).

Si el usuario desea profundizar en un tema, el programa cliente envía al servidor la "galleta" correspondiente a ese trozo de información. No obstante, es relativamente fácil

"La gente ataca sistemas individuales, no la red per se."

—Dorothy E. Denning, Universidad de Georgetown



modificar la tal galleta para que especifique dónde está localizada la información en la máquina del servidor, lo cual supuestamente ha de mantenerse en privado. Un servidor Gopher ingenuo entregará estos ficheros privados sin verificar que la galleta que recibe se ajuste a una de las opciones del menú presentado. Aunque es fácil limitar los servidores Gopher para que sólo tengan acceso a información pública, por defecto se les da rienda suelta.

Bits engañosos

El no comprobar la idoneidad de los comandos es un descuido común. La pauta la da el correo electrónico, uno de los servicios esenciales de la red: llámase carta a un fichero de texto que consta de un encabezamiento —donde se especifica remitente, destinatario, asunto, fecha, hora e información de encaminamiento— seguido por una línea en blanco y el cuerpo del mensaje. Aunque los programas de correo suelen rellenar con precisión las líneas de encabezamiento, no hay muchos obstáculos para que un bromista o malintencionado inserte la información que le pase por la cabeza. Un mensaje con expedidor "presidente@casa blanca.gob" puede haberse originado en Amsterdam con la misma facilidad que en el Despacho Presidencial de Washington, D.C. Falsificar el correo electrónico es trivial; el problema es que, al crecer Internet, también hay un mayor incentivo para tales trampas y un mayor peligro de caer en ellas. Las compañías y los particulares han comenzado ya a operar comercialmente a través de correo electrónico, y se está traficando con dinero real y mercancías sobre la base de promesas electrónicas.

Los expertos de la informática han elaborado protocolos para comprobar el origen de los mensajes de correo electrónico, pero los tramposos también perfeccionan sus técnicas. Ciertos administradores de sistemas recomiendan la utilización de los "duendes IDENT". Si un tramposo se conecta a un servidor de correo y le da una identificación suplantada (el primer paso en el envío de un mensaje falsificado), el servidor de correo puede interrogar al duende IDENT agazapado en la máquina del impostor.

Para otros, en cambio, IDENT es inocuo; el nombre que devuelve el duendecillo es tan digno de confianza como el propio ordenador en que se ejecuta. Una vez que los bandidos informáticos se han hecho con el control de una máquina —bien por acceso a ella o porque es suya— pueden configurar IDENT de manera que responda a las interrogaciones con el nombre que a ellos se les antoje.

Algunos administradores de sistemas afrontan la amenaza de estas imposturas prohibiendo las conexiones a sus ordenadores desde porciones de Internet no dignas de confianza. A cada organización particular, o dominio, dentro de Internet le corresponde una serie de direcciones numéricas, y por ello es fácil rechazar las conexiones procedentes de ordenadores de un dominio que se considera invadido por los piratas.

Incluso tal medida es susceptible de contraataque. Spafford indica que la mayoría de las máquinas se valen de "servidores de nombre de dominio" para traducir en ambos sentidos entre direcciones numeradas de la red y dominios tales como "xerox.com" o "unicomp.edu". Pero los servidores de nombre son meros ordenadores corrientes, y por tanto vulnerables al engaño y a la intrusión. Las guías de rutas que proporcionan pueden ser reescritas con fines delictivos. Un salteador puede modificar la base de datos de servidores de nombre de manera que res-

ponda a cualquier ordenador interrogante que la dirección perteneciente, por ejemplo, a "malo.vicioso.bandido.org" está en el lugar de "harvard.edu". El ordenador que acepte conexiones de la Universidad de Harvard dejará entonces entrar también a los piratas. De hecho, como se lamenta Spafford, es casi imposible que cualquier programa sepa con certeza de dónde vienen los paquetes de datos que recibe vía Internet, o a dónde van los paquetes que envía a través de esta red.

Otro problema de seguridad tiene su raíz en la propia versatilidad, por otro lado tan útil, de los ordenadores interconectados en red. Tal vez el mejor ejemplo es el "error enviado por correo", devastador fallo que ha reaparecido una y otra vez durante la historia de la red. Se produce este error porque la mayoría de los programas de correo permiten enrutar mensajes no sólo a los usuarios sino también directamente a ficheros o programas específicos. La gente envía correo, por ejemplo, a un programa llamado vacaciones, el cual responde informando a los corresponsales de que el destinatario deseado está fuera de la ciudad. Muchos envían también su correo a través de programas filtro capaces de retransmitirlo a un destino elegido entre varios atendiendo al remitente, al tema o al contenido.

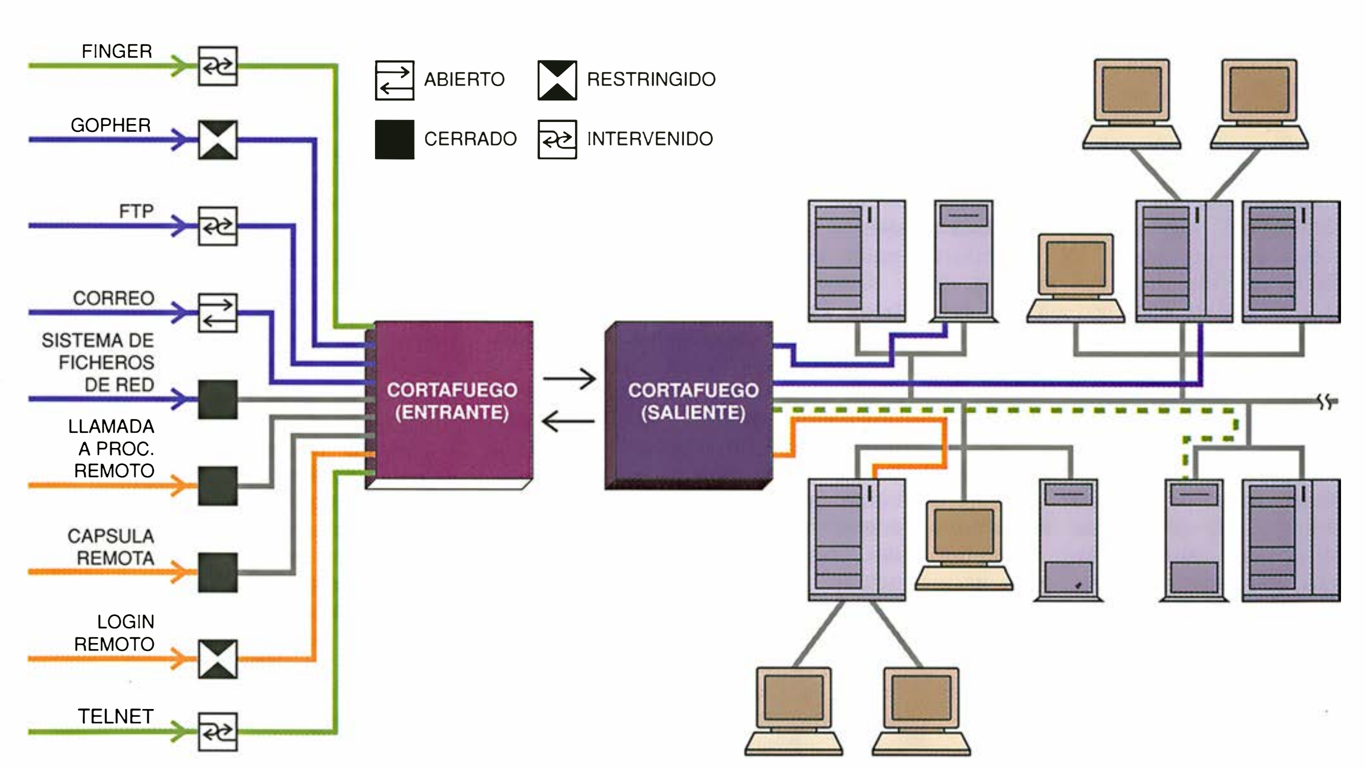
Pero este mismo mecanismo se puede trastornar para que envíe correo electrónico a un programa concebido para ejecutar "guiones de cápsula", los cuales consisten en una serie de comandos que realizan funciones de sistema, tales como extraer información de ficheros o borrar todos los ficheros anteriores a cierta fecha. Este programa interpretará entonces el cuerpo del mensaje como un guión y ejecutará cualquier comando que contenga. Dichos comandos podrían determinar que se enviara al intruso una copia del fichero de contraseñas del ordenador receptor para su análisis, y con ello abriría una puerta trasera para posteriores intrusiones o sencillamente para destrozar los datos almacenados en el receptor. El correo enviado a ciertos ficheros puede tener efectos similares.

Se han divulgado remedios para la última encarnación del error enviado por correo en la Internet, y presumiblemente han sido puestos en práctica por la mayoría de los administradores de sistemas que los hayan conocido, pero muchos sistemas siguen siendo vulnerables. Además, otros programas, que no son de correo electrónico, presentan fallos análogos.

Todavía es más deprimente que el correo electrónico no sea el único medio de introducir datos incontrolados en el ordenador de una víctima. Steven M. Bellovin, de los laboratorios Bell, señala que Gopher y otros programas de extracción de información también transfieren grandes ficheros, susceptibles de identificación errónea. Un pirata tendría que pasar ciertos apuros para montar un servidor de Gopher corrupto, e incluso tendría que almacenarlo junto con información útil para engatusar a la gente a que se conectara con él. "No me sorprenderé cuando ocurra esto", afirma Bellovin.

Cortafuegos en el ciberespacio

Si Internet es también para los ordenadores tierradenadie llena de invisibles peligros, ¿cómo deberán protegerse a sí mismos los recién llegados al ciberespacio? El primer nivel de defensa consiste en educar a los usuarios y administradores de sistemas para que eviten los errores estúpidos. Todavía hay gente que escribe sus contraseñas con el teclado



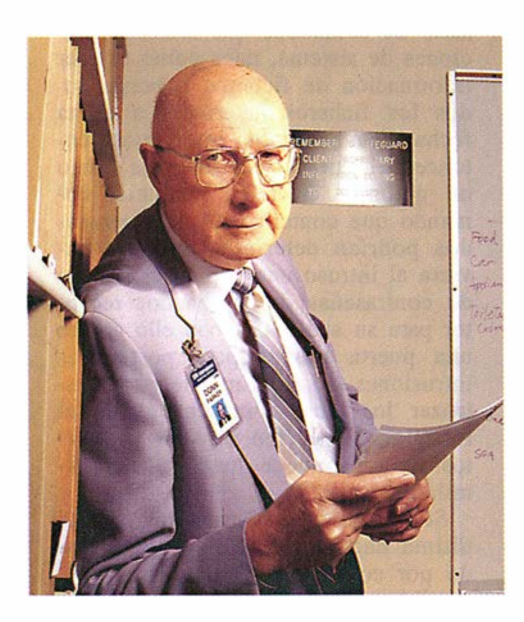
3. EL CORTAFUEGO DE LA RED impide que los paquetes de datos maliciosos causen estragos en ordenadores fiables. En ciertos casos, el cortafuego sólo permite el acceso desde posiciones Internet de confianza a determinadas máquinas que él resguarda. O solamente deja pasar información evidentemente "segura" (quizá permitiendo a los usuarios leer correo desde posiciones remotas, pero no ejecutar programas reservados). Otras veces es imposible distinguir entre uso seguro y uso inseguro de un servicio de la red, y por ello deben bloquearse todas las peticiones. El cortafuego podría también proporcionar un sustituto para algunos servicios de red (tales como finger, telnet o ftp), que realiza casi todas las funciones de éstos sin ser tan vulnerable.

o que no utiliza contraseña alguna para cuentas reservadas del ordenador. Cierta estudiante de posgrado, nombrada administradora de un grupo de estaciones de trabajo en la Universidad de Michigan, descubrió que con un sencillo programa de adivinación de contraseñas podía acceder a la cuarta parte de las cuentas de sus usuarios. Cinco de los 80 usuarios habían elegido su nombre como contraseña. Algunos administradores han instalado programas que rechazan las contraseñas basadas en palabras del diccionario o en identificadores personales obvios.

El siguiente nivel de defensa es el llamado cortafuego, un ordenador que protege las redes internas de la intrusión. Casi todas las grandes compañías lo han instalado hace tiempo, y muchas universidades lo están adoptando también. Los cortafuegos examinan todos los paquetes que entran y salen de un dominio con el fin de limitar los tipos de conexión que pueden establecerse libremente desde Internet. Asimismo pueden restringir la información que transportan esas conexiones.

"En lo civil, restricciones. En lo penal, restricciones. En lo tecnológico, restricciones."

—Donn B. Parker, SRI



Una cosa es proponer un cortafuego y otra muy diferente es construirlo. Ciertamente a los usuarios les encantaría tener acceso sin cortapisas a todos los servicios de Internet, pero tropiezan con una dura realidad: "Hay cosas que no pueden hacerse con plena seguridad", afirma Marcus J. Ranum, de Trusted Information Systems. Ranum, que ayudó a instalar el cortafuego para "casablanca.gob", cita a Gopher y Mosaic como dos programas de naturaleza fiable que desafían los intentos de añadirles seguridad mediante un cortafuego, y sostiene que en tales casos los expertos en seguridad deben darse por satisfechos con reducir los riesgos al mínimo en lugar de hacerlos desaparecer.

Como mínimo absoluto, el cortafuego debe dejar pasar el correo (aunque los programas implicados caigan en inseguridades). Cumplido esto, los usuarios desean tener acceso a máquinas de cualquier lugar de Internet y poder extraer ficheros de centros de archivo públicos o de los directorios de colegas de otras instituciones.

Para llevar a cabo estas funciones, AT&T construyó un cortafuego compuesto por dos ordenadores especializados, uno conectado a Internet y otro a la red interna corporativa. La máquina exterior examina todo el tráfico entrante y transfiere sólo los paquetes "seguros" a su homóloga interna. Además, únicamente aceptará tráfico saliente que proceda de la máquina interna, puerta de acceso a la red corporativa, por lo que todo intento ilícito de sacar información fuera del dominio de AT&T fracasará mientras subsista esa puerta de acceso. Por otra parte, dicha máquina interna aceptará exclusivamente el tráfico enviado por la externa, con lo que se bloquea el paso a los paquetes no autorizados que hayan logrado llegar a ésta.

Otros servicios son más problemáticos. Por ejemplo, sería muy bonito poder entrar en el ordenador del propio despacho desde cualquier otro lugar de Internet. Sin embargo, todo ordenador intermedio que retransmita tráfico por Internet puede estar intervenido y leer los paquetes que circulan por él (incluyendo los que contienen contraseñas). De hecho, en dos distintos incidentes ocurridos en octubre de 1993, unos piratas consiguieron acceder a Panix, estación Internet de acceso público en Nueva York, y a BARRNet, una vía de Internet en California, e instalaron en ellas programas para "husmear paquetes". Estos programas observaban todos los datos que pasaban y grababan nombres y contraseñas de usuarios a medida que éstos se iban registrando en centenares de otros sistemas.

Los ataques de este tipo dejan anticuadas las contraseñas tradicionales. Por el contrario, la conexión segura a máquinas protegidas por cortafuegos requiere un tipo distinto de autenticación, tal que no pueda ser "husmeado" y después reproducido para obtener un acceso ilícito. Existen ya dos métodos de uso limitado: la contraseña "de un solo uso" y la "respuesta al reto".

Las contraseñas de un solo uso están contenidas en una lista que lleva consigo el usuario autorizado, y si alguna de ellas vuelve a utilizarse será señal de que hay una tentativa de intrusión. Los sistemas de respuesta al reto no tienen lista de contraseñas, sino que exigen responder a una pregunta aleatoria para permitir el acceso. Muy a menudo la pregunta consiste en un número que ha de transformarse matemáticamente mediante una clave secreta sólo conocida de los usuarios legítimos. Casi nadie puede multiplicar mentalmente números de 100 cifras, y por eso los equipos de respuesta comercializados suelen emplear una "calculadora criptográfica", que se carga con la clave y se activa por una corta secuencia de fácil memorización.

El cifrado es la clave

Si las contraseñas han de transmitirse cifradas a través de Internet, ¿qué podrá decirse de otras informaciones confidenciales? Se está trabajando en normalizar un correo electrónico en el que se potencie el carácter privado, pero su implantación generalizada dista todavía mucho. El problema de la interfuncionalidad es muy engorroso; a menos que todo el mundo tenga programas capaces de tratar mensajes cifrados, éstos serán de escasa utilidad.

Además de ofrecer intimidad, el cifrado facilita la autenticación: los mensajes codificados mediante las llamadas claves públicas identifican al expedidor y al destinatario. Pero en torno de los programas de cifrado se ha levantado una tormenta política y legal. Aunque numerosos defensores de las libertades cívicas y científicos de la informática se opongan a la regulación, algunos la respaldan.

La cuestión no es si el ciberespacio estará sujeto a una legislación, sino más bien cómo y cuándo se impondrán la ley y el orden. Ranum contempla una Internet formada en su mayor parte por enclaves priva-

dos, resguardados tras cortafuegos que él y sus colegas han construido.

Denning se considera a sí misma optimista. Apoya las medidas de seguridad local, pero "la seguridad no me hace perder el sueño", dice. Farber, también cautelosamente optimista, ve que la Internet se enfrenta a dos posibles evoluciones en los años venideros: una rápida expansión de los servicios existentes, o una revisión fundamental de la ingeniería sobre la cual pueda asentarse el futuro. Y no deja ninguna duda sobre la opción que prefiere. Spafford piensa muy similarmente, pero con tintes más sombríos. "Todo el mundo quiere funcionar con lo que ahora existe", explica, "pero las normas actuales están podridas. No son las bases ideales para la construcción de una red".

Aunque los científicos rediseñaran enteramente la Internet, tal vez sería impensable instaurar nuevas normas, dadas las enormes inversiones en los antiguos equipos y soportes lógicos. Hasta tal punto depende la Internet de la cooperación voluntaria, que introducir en ella cambios radicales sería casi imposible. Quizá la evolución por sectores, se aduce, sea la única alternativa posible. Ninguna organización particular comprende el concepto de infraestructura nacional de información suficientemente bien para tomarla a su cargo.

Mientras tanto, la red sigue creciendo y la gente y las empresas le confían sus conocimientos, sus dineros y su buena reputación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PRACTICAL UNIX SECURITY. Simson Garfinkel y Gene Spafford. O'Reilly and Associates, 1992.

ZEN AND THE ART OF INTERNET. Brendan P. Kehoe. Prentice-Hall, 1993.

IMPROVING THE SECURITY OF YOUR SITE BY BREAKING INTO IT. Dan Farmer y Wietse Venema. Disponible por ftp desde win.tue.nl como /pub/security/admin-guide-to-cracking.Z.

FORUM ON RISKS TO THE PUBLIC IN COMPUTERS AND RELATED SYSTEMS. Disponible vía el newsgroup de Usenet comp.risks, o por correo electrónico desde risks-request@csl.sri.com. Los números atrasados están disponibles por ftp desde crvax.sri.com en el directorio RISKS:

Newsgroups de Usenet que cubren la seguridad: comp.security.misc; comp.security.unix; alt.security

Pueden conseguirse las recomendaciones del CERT por ftp desde cert.org

La información relacionada con la seguridad puede obtenerse por ftp desde tis.com (Trusted Information Systems) y research.att.com

Ciencia y empresa

Investigación aerodinámica

Proyecto LARA

En la técnica relacionada con el flujo laminar se halla depositada hoy la mayor esperanza de reducción del consumo de combustible por medios aerodinámicos. Se pretende ahorrar hasta el 20 por ciento mediante la laminarización de las alas, las góndolas de los motores y las superficies estabilizadoras, además de mejorar el rendimiento energético y la compatibilidad ambiental de los futuros aviones europeos.

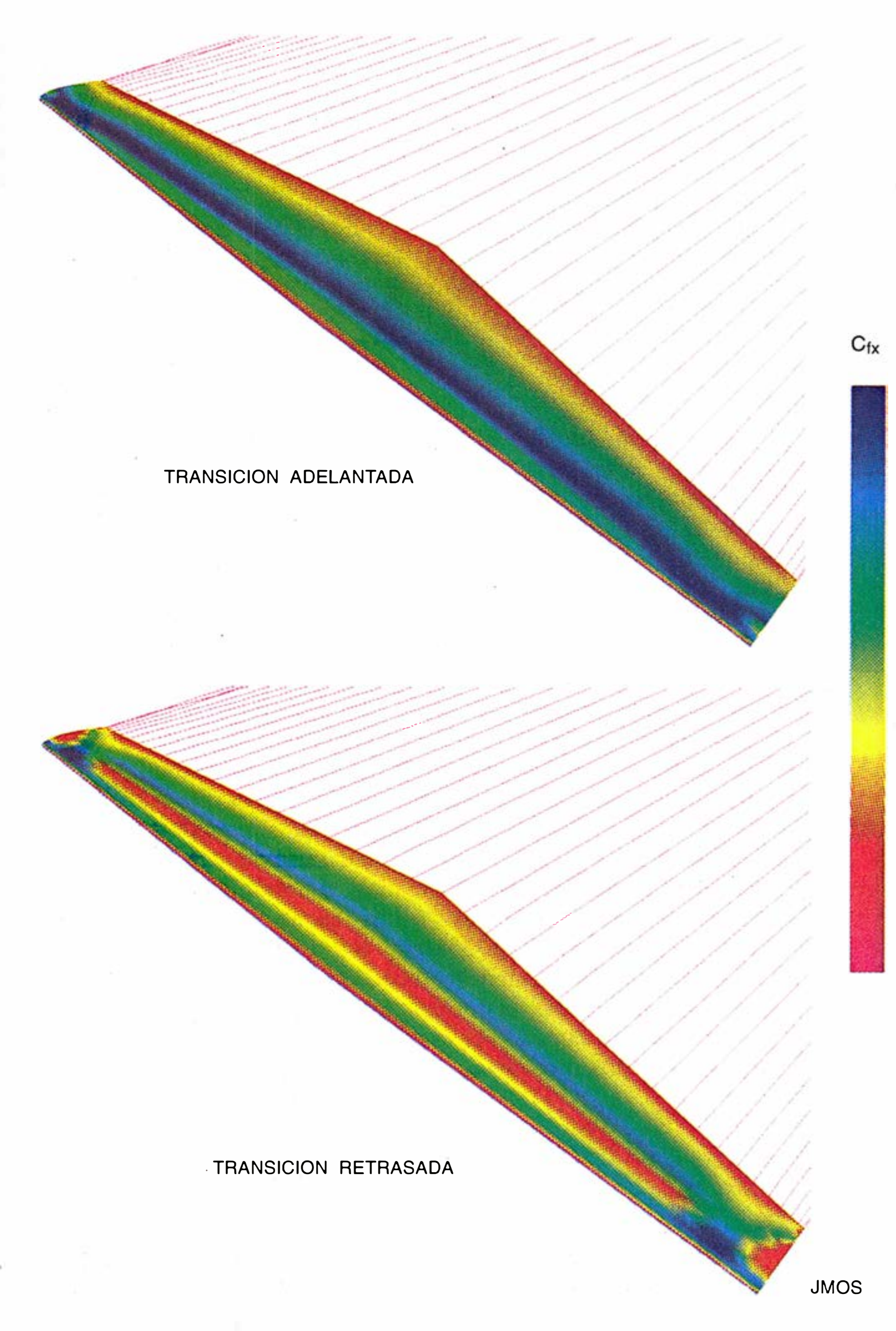
El proyecto LARA (acrónimo de "*LA*minar flow *R*esearch *A*ction") es la continuación de la investigación iniciada en el programa BRITE/EURAM ELFIN I. En ELFIN (de "*E*uropean *L*aminar *F*low *IN*vestigation"), el trabajo se centró en la predicción de la transición del flujo laminar y en la validación apoyada en los experimentos de los programas de cálculo; en LARA se abordan temas aplicados de flujo laminar, por ejemplo, el comportamiento de la corriente fuera de las condiciones de diseño.

El proyecto está dividido en dos tareas principales: tecnología de alas laminares y tecnología de góndolas (de motores) laminares. La primera se subdivide, a su vez, en tres subtareas: preparación y evaluación de los datos recogidos en ensayos en vuelo; mejora de los programas de diseño de alas laminares y desarrollo de aspectos relacionados con el flujo laminar híbrido en los métodos de análisis transónico, y, por último, integración en la zona del borde de ataque de los dispositivos hipersustentadores, protección contra la contaminación y requisitos de succión.

Compete a la tecnología de grupos motopropulsores laminares investigar el comportamiento del flujo alrededor de góndolas a bajas velocidades e incidencias elevadas, propias de las condiciones de despegue y aterrizaje. A este respecto, los EE.UU. llevan una clara ventaja sobre Europa, según quedó patente en los ensayos en vuelo del Boeing 757 HLF (abreviatura de "Hybrid Laminar Flow") en 1990 y en los ensayos en 1992 de la góndola laminar de General Electric.

La clave para la aplicación práctica de la tecnología de flujo laminar reside en la disponibilidad de un sistema eficaz de protección frente a la contaminación del borde de ataque, así como en la integración de los dispositivos antihielo con los de succión de capa límite.

En el proyecto LARA participan trece organismos europeos (industrias, centros de investigación y universidades) de siete países. En España, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) colabora en el desarrollo y mejora de métodos de



Coeficientes de fricción proyectados en la dirección de vuelo sobre el extradós de un ala de prueba. En el dibujo superior la capa límite es turbulenta en la casi totalidad de la superficie, mientras que en el inferior es laminar hasta aproximadamente la mitad de la cuerda. Como dato orientativo, la reducción de la resistencia de fricción que se consigue en este caso es del 25 %, mientras que la de la total es del orden del 15 %

diseño de alas laminares utilizando la ecuación del potencial completo. La particularidad del caso está en el hecho de que tanto la curvatura del ala como su variación en la zona del borde de ataque es mucho mayor que en las alas convencionales, lo cual está forzado por la necesidad de conseguir gradientes de presión favorables en la dirección local de la corriente sobre la mayor zona posible del ala. Ello obliga, entre otras cosas, a definir la geometría con mucha mayor precisión. Además, la presencia de dispositivos hipersustentadores de borde de ataque junto con los de succión de capa límite y los consiguientes costes adicionales de mantenimiento plantea nuevos problemas técnicos.

En paralelo con la teoría del potencial se están desarrollando métodos basados en las ecuaciones de Euler, que tienen en cuenta el salto de entropía a través de las ondas de choque. Las comparaciones que está previsto efectuar entre ambos métodos determinarán en qué condiciones son aplicables cada uno de ellos con el máximo rendimiento.

Se ha resuelto ya el problema bidimensional del diseño de los perfiles del ala, al menos desde el punto de vista teórico. Bastante avanzado se encuentra también el diseño de las alas. Una parte fundamental del proyecto serán los ensayos en túnel y en vuelo, todavía por hacer, que servirán para la evaluación práctica de los dispositivos utilizados y para la validación de los métodos de cálculo desarrollados.

FERNANDO MONGE GÓMEZ
Jefe del Laboratorio de Estudios Aerodinámicos. INTA, Madrid

Memorias asociativas

Fiabilidad y capacidad

La capacidad de memoria de un ordenador se mide por el número de biestables, o registros, que contiene; cada ocho biestables suponen un byte de información almacenada. Para las lecturas y escrituras de datos desde los circuitos de memoria o hacia ellos, nos valemos de algoritmos de seguridad muy sencillos: el bit de paridad para las memorias electrónicas (aleatoria, o RAM, y de sólo lectura, o ROM) y los códigos de redundancia cíclica (CRC) y similares, para las unidades de memoria de masas.

Pero cuando la información aparece distorsionada por ruidos de transmisión, dejan de tener sentido los sistemas clásicos de memoria. Debemos recurrir entonces a sistemas capaces de efectuar un procesamiento inteligente de los datos. A veces no importa tanto almacenar un dato cuanto buscar un concepto asociado al mismo. Fijémonos en la memoria humana: nunca recordamos las cosas exactamente como las vimos. Las impresiones de los sentidos nos evocan algo que permite identificarlas. Nos hacemos una idea a través de múltiples configuraciones de las señales que recibimos (tipos, colores o tamaños de un objeto), envueltas en una elevada contaminación de las mismas (imágenes distorsionadas, parciales, con ruido).

En el ordenador, la memoria accedida por dirección (MAD) guarda y recupera la información mediante la dirección del registro encargado de almacenarla. El método alternativo es el de las "memorias accedidas por contenido" (CAM), en las que se compara el dato de entrada con todos los contenidos en la memoria. En las memorias asociativas, englobadas bajo el epígrafe de memorias bipolares asociativas (BAM), los datos de entrada no forman parte obligatoria de los contenidos almacenados en ella, pero son la clave para su búsqueda y localización; los datos de entrada son la identificación funcional de los contenidos de la memoria. El proceso de extracción de una información no requiere, pues, un mecanismo de simple comparación; posee sus propios algoritmos de búsqueda.

A la entrada de la memoria se presenta cierta configuración de datos, el patrón de entrada, que ha sufrido alteraciones o mutilaciones; a la salida, esperamos obtener el patrón original perfectamente reconstruido. Hablamos en ese caso de una memoria autoasociativa, una de cuyas formas habituales es la que almacena los patrones mediante correlación de sus valores (memoria autoasociativa por correlación o, autocorrelador).

Desde el punto de vista matemático, un autocorrelador es una matriz de dimensión $N \times N$ formada mediante la suma de los productos de todos los vectores a memorizar. Antes hay que reconfigurar la estructura de los vectores; a modo de ejemplo, partiendo de un conjunto de valores binarios para un patrón a visualizar, con puntos de valor 1 (iluminados) o 0 (oscuros), pasamos a su equivalente bipolar, es decir, la iluminación conserva su valor 1 original, y el punto oscuro pasa a tener valor negativo (–1). Con estos vectores bipolares, podemos ya formar la matriz de autocorrelación por el simple método de multiplicar cada "vector" de imagen por sí mismo. Entonces se dice que la memoria ha almacenado P patrones.

Cuando el número y tamaño de los vectores a almacenar alcance cierto umbral, la programación impondrá restricciones excesivas en cuanto a los tiempos de respuesta, hasta el punto de no poder utilizarla. En este caso se utilizan redes neuronales. Una vez diseñado el autocorrelador, quedan fijados los valores de los pesos de conexión sináptica. El conjunto funciona como una memoria PROM (o REPROM si es posible volver a cambiarlos); la memoria está localizada en las conexiones entre neuronas (las sinapsis).

Los autocorreladores sirven, pues, para identificar y reconstruir señales e imágenes. Pero, ¿cómo saber que, ante una determinada entrada, la salida se convertirá en respuesta permanente? Este problema de *estabilidad* es el de la garantía de que, al cabo de un tiempo de cómputo, se obtenga una salida siempre disponible.

En cuanto a la seguridad de su resultado, el método más popular está basado en la función energética de Liapunov, que consiste en definir una función de energía relacionada con el autocorrelador y demostrar, para todo tipo de actuación de éste, que tal energía disminuye hasta llegar a un estado de energía mínima y, por tanto, punto final de la trayectoria. Esta función decrece continuamente; el autocorrelador evoluciona por estados de energía decreciente hasta alcanzar el nivel mínimo, donde permanecerá indefinidamente, dando por finalizado el proceso de reconocimiento y reconstrucción del primitivo patrón de entrada.

Debe resolverse otro problema, el de la *capacidad* de la memoria. Cuando se trata de las memorias al uso, sabido es que tantos registros suponen igual número de bytes almacenables. Aquí, la respuesta no es tan sencilla, pues a medida que aumenta el número de patrones que deseemos almacenar, la dimensión de la red deberá crecer de forma exponencial, hasta el límite en el que habrá de aumentar un infinito para cada nuevo patrón.

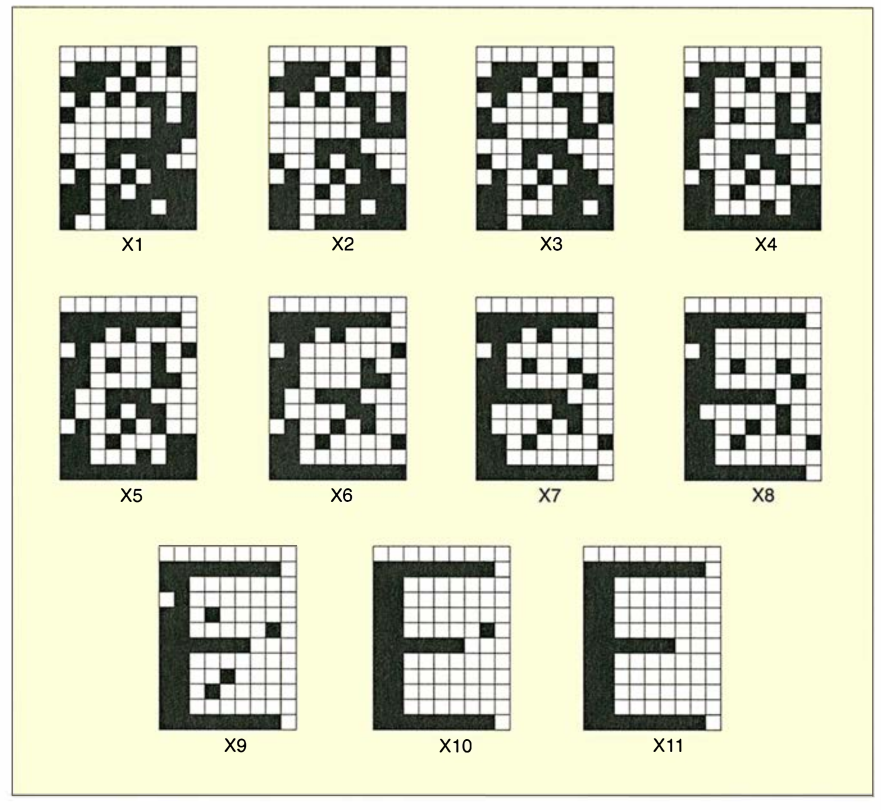
Este funcionamiento de los autocorreladores se mueve dentro de lo que suele denominarse "Primer Orden", es decir, la asociación de los distintos vectores corresponde a un producto interior simple. Si se presentan situaciones no lineales tendremos que acudir a la definición de hiperplanos. Las correlaciones son ahora

de segundo orden o superiores. Hay que sintetizar una red con un número de conexiones mucho más elevado, aunque siguiendo siempre el esquema planteado. Pero entonces torna a aparecer el problema de la capacidad de almacenamiento de estas memorias. Según parece, a medida que aumenta la dimensión, disminuye la capacidad relativa; el límite también en estas situaciones es de cero.

Los autocorreladores no son las memorias asociativas más frecuentes, sino un caso particular de los heterocorreladores, en los que se construyen asociaciones de patrones por parejas. Se trata de asociar los vectores de dos conjuntos {A} y {B} equidimensionales para generar un conjunto de N pares (A, B) :{(A, B), (A, B),..., (A, B)}. Con ellos, construimos una matriz de correlación por productos de los vectores de cada par, con la misma estrategia de los autocorreladores.

Los heterocorreladores, o memoria asociativa bidireccional (BAM), operan de manera similar a los autocorreladores; y así, a la "entrada" del sistema se presenta un vector desconocido *a*, diferente de los del grupo {A}. Generamos su equivalente bipolar X que no estará incluido en {X}. Con la matriz M, obtenemos el vector de salida Y = XM del que se obtiene el binario *b*. Ahora, puede ocurrir que el vector *b* esté entre los del conjunto {B} o no. En caso afirmativo, el proceso habrá terminado, mientras que, en caso negativo, debemos volver a aplicar la matriz M, si bien en sentido contrario, de manera que el proceso se repite de forma indefinida.

Un caso muy práctico en el que se pone, además, de manifiesto su eficaz rechazo al ruido es el propuesto por Kosko en 1987, en un trabajo clásico donde se estudiaba la aplicación de las BAM a procesado de señales y su síntesis mediante redes de neuronas. Para ello, se tomaron como vectores del conjunto {A} las letras M, S y G, dibujadas sobre una cuadrícula de 10×14 puntos, y como vectores del conjunto {B} las letras V, E y N, con un dibujo de 9×12 puntos. La asociación se hizo con las parejas (M, V), (S, E) y (G, N). Las dimensiones de las capas eran, respectivamente, de 140 y 108 neuronas. La matriz M resultante, de dimensión 140×108, aunque imposible de desarrollar aquí, se muestra inmune frente al ruido.



Los 11 pasos de reconocimiento del PAR S-E (KOSKO, 1987). Se presentó una letra S con una distorsión del 40 %, obteniéndose a la salida la respuesta 1 de la figura 2. Cada vez que se llevaba a cabo una aplicación de la matriz M, se iban obteniendo los resultados (en la parte de los vectores {Y}) que allí aparecen, hasta que al final del paso 11 se ha regenerado completamente la letra E, asociada con la S. Evidentemente, esta S es la salida {X} que se obtiene de la otra capa de neuronas, de forma que la secuencia de salidas sigue un camino evolutivo similar

Todas las razones expuestas en el caso de los autocorreladores son aplicables aquí. La diferencia es que ahora hay que generar dos conjuntos de vectores, los X y los Y con la única matriz M, lo que indica que la síntesis se realiza mediante dos capas de neuronas, una que tiene por pesos sinápticos los valores en columna de M y la otra los valores en filas.

Aquí son también de aplicación todas las consideraciones relativas a la simulación de los pesos *m*, hechas para el autocorrelador. Esto nos lleva a darnos cuenta de que ni el total de memoria ocupada ni el tiempo en la simulación serán el doble para una BAM que para un autocorrelador. En efecto, una vez fijados los valores de los contactos sinápticos para una de las capas, quedan automáticamente fijados los de la otra. Desde el punto de vista de las redes neuronales, importa destacar la falta de intrarrealimentación; es decir, en una BAM se han perdido los lazos que conectan las salidas de una capa con las entradas a la propia capa. Lo que significa que aún quedan muchas funciones por sintetizar mediante redes neuronales.

Relacionado con la estabilidad y la capacidad, yace un problema que hemos dejado aparte: no podemos asegurar que el mínimo al que evolucionará la red corresponda a cualquiera de los patrones almacenados. Es decir, si tenemos una pareja (A, B), la situación llega al extremo de que no podemos asegurar que ante la entrada A se obtenga nunca la salida B. Cabe una salida totalmente inesperada. Es decir, la BAM evoluciona espontáneamente hacia mínimos locales de energía de forma independiente. Ese problema puede arruinar por completo la memoria asociativa.

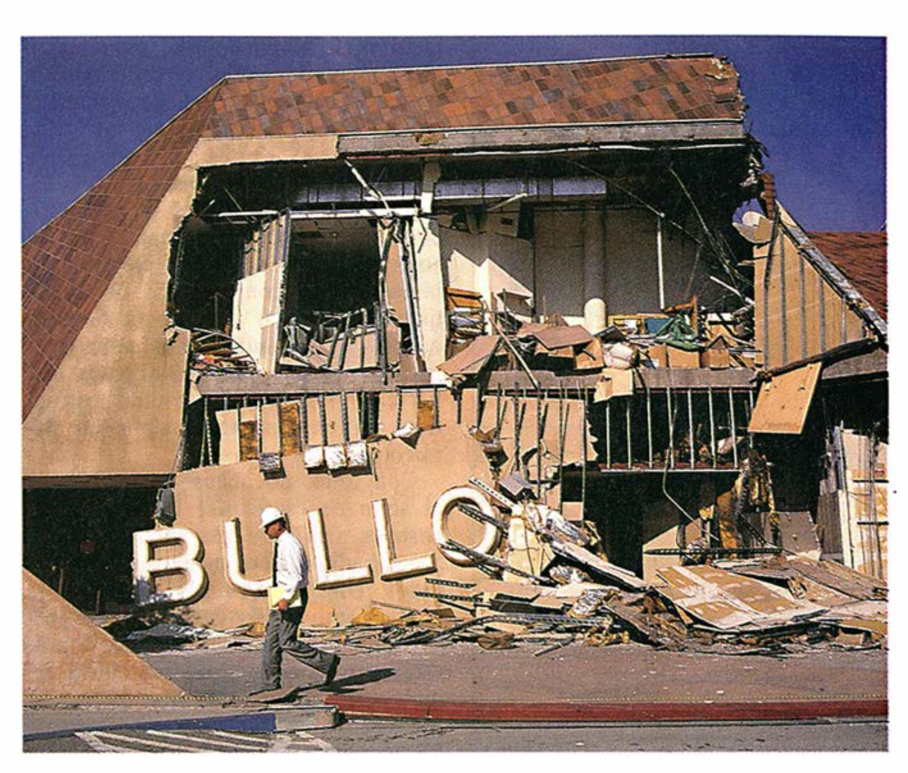
Una de las ventajas de las memorias de correlación consiste en su rigor repetitivo a la hora de ampliar el campo de acción. De la misma forma que sobre los autocorreladores hemos presentado los de orden superior a modo de extensión de aquellos, podremos ampliar los heterocorreladores con bastante sencillez. El paso a las de segundo orden abre el camino para órdenes aún mayores; no se trata de asociar tripletas de patrones, sino de aumentar el grado de asociación entre los mismos pares de vectores de entrada de los que se ocupaba la de primer orden.

Para evitar los inconvenientes de los

dos tipos de memorias asociativas podemos combinarlos en una única memoria, para generar autocorrelaciones entre las entradas, correlaciones con las salidas y, finalmente, otra vez autocorrelaciones entre éstas. Se trata de generar una memoria dotada del diagrama de conectividad más amplio que se nos pueda ocurrir.

En esa línea, una memoria real constituye el modelo adecuado para averiguar hasta dónde puede llegarse en la construcción de sistemas asociativos. Un caso de altas "prestaciones" estará, pues, integrado a la manera de una gran red en la que las interacciones se realicen mediante autocorreladores de órdenes muy elevados, y las interconexiones lo sean entre distintas BAM de órdenes, asimismo, muy elevados. Podríamos encontrarnos con memoria de orden superior formando parte de otras de órdenes aún mayores, según un esquema que puede repetirse hasta el infinito, limitado sólo por las disponibilidades materiales a las que estemos sujetos.

FRANCISCO J. LÓPEZ ALIGUÉ
Universidad de Extremadura



Daños producidos por un terremoto de moderada intensidad. Ciertos sistemas que responden activamente a los movimientos del suelo podrían mitigar los perjuicios de futuros temblores

Edificios inteligentes

Contra seísmos

Cualquier terremoto de moderada intensidad se lleva por delante muchas vidas humanas y provoca pérdidas materiales de centenares de miles de millones de pesetas. ¿Qué podemos hacer para prevenir semejante daño?

Estamos asistiendo a una serie de innovaciones en ciencias de materiales, ingeniería y electrónica que permiten construir edificios que resistan los embates de los terremotos. Podemos mantenerlos en pie si logramos que respondan como lo haría un ser humano, alterando su centro de gravedad. La noción ésta de "estructura adaptativa" subyace bajo una técnica conocida como amortiguamiento activo por masa. Se trata de unir una pesada masa, montada en el tejado de la casa, a unos actuadores hidráulicos controlados por ordenador. Los sensores de movimiento instalados en el edificio envían señales al ordenador, que a su vez manda a los actuadores alterar la posición de la carga sobre el tejado para contrapesar el movimiento de la construcción.

En 1987, la empresa Kajima construyó el primer edificio que usaba el amortiguamiento activo por masa. Desde entonces, una docena de edificios, todos ellos en el Japón, han incorporado sistemas similares y muchos más están en proyecto. El sistema de amortiguamiento por masa permite aislar de las mareantes oscilaciones causadas por los vientos fuertes. Ninguno de esos edificios basa su defensa contra intensos terremotos en dispositivos de control activo, aunque el sistema de amortiguamiento por masa podría en principio modificarse para aplicarlo a este caso.

La biología sirve de inspiración también para un segundo método. Aquí, unos actuadores tensan riostras a la manera de tendones, con lo que neutralizan los movimientos debidos al viento o los terremotos. Hace cinco años, el equipo de Tsu T. Soong, de la Universidad de Nueva York en Buffalo, inició una colaboración con la empresa nipona Takenaka para construir una estructura de ensayo. Los sistemas tendinosos son particularmente apropiados para ser instalados en estructuras débiles o dañadas, avanza Soong.

Sami S. Masri, de la Universidad del Sur de California, recurre al caos para luchar contra los seísmos. Cuando, por culpa de un temblor, oscila el edificio, unas toberas montadas en el tejado disparan ráfagas de aire comprimido para producir movimientos breves y caóticos. Las fuerzas caóticas difuminarán las oscilaciones armónicas de la construcción, que son las más peligrosas y las que causan el derrumbamiento catastrófico.

Para crear estructuras más sólidas, los investigadores están también empleando los llamados materiales inteligentes: substancias cuyas propiedades mecánicas son fácil y rápidamente ajustables. En esta línea, el grupo de Robert Hanson, de la Universidad de Michigan, explora las posibilidades ingenieriles de los fluidos electrorreológicos, que se transforman de líquido en gelatina bajo la acción de una corriente eléctrica. Se podrían incorporar tales fluidos a los cimientos de un edificio. Al temblar el suelo, el fluido filtraría los impulsos de alta frecuencia, los más peligrosos. Un ordenador electrificaría entonces el fluido automáticamente y lo endurecería de modo que la estructura pudiera traspasar al suelo la energía de los movimientos de baja frecuencia. Tal sistema requeriría un modesto consumo de electricidad y podría ser accionado por acumuladores sencillos.

Los materiales inteligentes podrían introducirse en múltiples diseños activos. Craig A. Rogers, del Instituto Politécnico de Virginia, defiende el actuador electrostático, al que describe como "un pedazo de papel de aluminio y un poco de mylar". Mediante la aplicación selectiva de una

corriente eléctrica, ese dispositivo elemental se puede convertir en un potente músculo capaz de mantener quieto un edificio durante un temblor.

Rogers estudia también las propiedades de los materiales piezoeléctricos, que se contraen cuando se les somete a una corriente eléctrica, y las aleaciones con memoria de forma, que tornan a su morfología original cuando se calientan, para contrarrestar los movimientos y esfuerzos que los edificios, puentes y otras estructuras sufren durante un episodio sísmico.

Con todo, no acaba de producirse el salto necesario del laboratorio de ensayos a la obra. Por citar un ejemplo paradigmático, no hay en los Estados Unidos un solo edificio de control activo. Por contra, las empresas japonesas han demostrado la rentabilidad económica de esa nueva arquitectura inteligente. La culpa, se dice, recae en el conservadurismo de los técnicos y en la angostura de las disposiciones legales.

COREY S. POWELL

¿Ecologistas o derrochadores?

Entre la grama y el césped

La historia social utiliza con frecuencia el símil de la grama y el césped. Cuidado con mil atenciones, el césped de los barrios ricos simboliza distinción y rango social. El dominio sobre la invasión de grama, pamplina, llantén, juncos y otras innumerables e indeseables formas de vegetación proclama el carácter de orden y justicia de una existencia alejada de las incomodidades de los cinturones urbanos.

F. Herbert Bormann, profesor emérito de ecología forestal en la Escuela de Silvicultura y Estudios Ambientales de la Universidad de Yale, y uno de los más destacados revisionistas del césped, ve las cosas con otra óptica. Para él, el césped es una metáfora del abuso del medio ambiente. Hace varios años, Bormann, a quien con su colega Gene Likens corresponde el crédito de haber descubierto que los bosques del noreste del país recibían lluvia ácida, convirtió el césped en un trabajo de investigación para once alumnos de segundo ciclo de Yale. El proyecto descubrió algunos hechos sorprendentes. “En cuanto a superficie, el césped es el segundo cultivo de los EE.UU.”, dice Bormann. Si se pusieran juntas todas las zonas de césped de los EE.UU., cubrirían 10 millones de hectáreas.

El césped constituye la base de una industria de mantenimiento que mueve 25.000 millones de dólares al año. El cuidado de las zonas verdes absorbe también recursos hidráulicos frecuentemente escasos y usa hasta 10 veces más insecticidas químicos por hectárea que una superficie equivalente de cultivo. Las zonas de césped en los EE.UU. absorben más fertilizantes sintéticos de los que la India emplea en todos sus campos de cultivo. En su descuidada hora de idas y venidas, la motocortadora expele una cantidad de contaminantes equivalente a la de un automóvil que recorriera 550 kilómetros.

Los detalles de este alegato acusatorio aparecieron en el libro *Redesigning the American Lawn: A Search for Environmental Harmony* (“Reproyectando las zonas de césped americanas: en busca de la armonía del ambiente”). Bormann es uno de los autores del volumen, junto con Diana Balmori y Gordon T. Geballe.

Bormann tiene una respuesta preparada para todos aquellos que querrían asestar un golpe al medio o simplemente sentirse virtuosamente verdes mientras disfrutan de horas no empleadas detrás de una cortadora: cultivar un “césped de la libertad”, de Bormann. Es fácil. Basta con no intervenir y dejar que la grama, pamplina, llantén, junco, acederas y aliagas crezcan a su aire.

GARY STIX



El césped de la libertad sustituye un monocultivo de césped por una maraña de hierbas que no necesita herbicidas

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Neomerología de los números bestiales

El que tenga inteligencia calcule el número de la bestia, porque es número de hombre. Su número es seiscientos sesenta y seis.
—San Juan, *Apocalipsis* 13:18

Las llamas del infierno flameaban entre columnas de humo. Un demonio verde, vestido con sudadera, deambulaba perezosamente por el ribazo de una laguna de aceite hirviendo, pasándose distraídamente de garra a garra un objeto pardusco de forma ovalada. En la pechera de la camisola veíase el número 666; en el dorsal leíase "LA BESTIA".

El segundo demonio, que era de un tono azul pastel, le dio unos golpecitos en el hombro. "Esto... disculpe usted, señor Bestia, mire..."

"¿Quién eres tú?" La Bestia volvióse y dedicóle una mirada despectiva a la camisola azulada. "¿Qué afeminamiento es ése y a qué viene lo de menos 847 $^1/_2$?"

"Es el número que me dieron cuando acepté el empleo que usted anunciaba."

"¿Un empleo? Bueno, veamos si sirves para algo. Echa una carrera y yo te lanzaré un pase." Junior, así se llamaba, salió al galope. La Bestia alzó un brazo huesudo, lo echó hacia atrás y proyectó uno de los objetos ovalados hacia la cabeza de Junior. Este trató de alcanzarlo, falló y se quedó mirando cómo rebotaba y se metía en el lago. El ovoide lanzó un chillido escalofriante.

"Lo siento, se me ha metido azufre en los ojos", se disculpó Junior, mirando las ondículas expandirse por la superficie ardiente de la laguna.

"¡Bah! Sólo era un alma barata de goma; ni siquiera estaba forrada de cuero. No te importe haberla perdido; siempre habrá montones de almas condenadas a las que dar patadas." Tomó otra de un enorme montón y la examinó atentamente. "¡Ah, *ella*!", exclamó la Bestia con desdén. "Estaba visto que acabaría aquí. Pero ella, al menos, sabe quién es", añadió, señalando el nombre estampado sobre el alma con letras góticas desiguales. "Yo, en cambio, no."

Junior se volvió de un azul más pálido todavía. Era cosa sabida que la Bestia estaba pasando por la típica crisis de identidad de media muerte. Sin avisar, el demonio verde se puso en pie de un salto y empezó a dar coces a cuanto le rodeaba. "¿QUIEN SOY YO?", rugía. "¡Llevo aquí miles de años y nadie me dice quién soy!"

"He oído decir que en arameo —el idioma original del libro del Apocalipsis— los símbolos correspondientes a 666 deletrean Nerón. ¿Cree usted que podría ser Nerón?"

"'Nerón la lira tañía mientras toda Roma ardía ...'. Lo del incendio me tiene sin cuidado, pero lo de tañer se me da bastante mal, ¿sabes?"

"Bueno, el padre Bongus, un jesuita, descifró que su número significa 'Martín Lutero'", aventuró Junior. "Se sirvió del sistema conocido por 'gematría', en el cual A = 1, B = 2, ..., hasta Z = 26."

"Todo eso ya lo sé. Pero, por otra parte, Michael Stifel, que fue un matemático alemán, 'demostró' que yo era el papa León X", retrucó la Bestia. "Stiefel empezó con 'Leo Decimus', y fue suprimiendo letras, hasta dejar LDCIMV."

"¿Por qué?"

"Esas letras corresponden a cifras de numeración romana. En total suman 1656, así que añadió una X, porque se trataba de León X, y eliminó una M, puesto que M es la inicial de 'misterio'." La Bestia hizo una mueca burlona. "¿Has oído alguna vez un razonamiento más necio?"

"Jamás", dijo Junior. "Salta a la vista que todo es puro artificio para obtener el resultado deseado."

"Exactamente. Nadie se plantea si existirá un método lógico que no de-



Numerales perfectos en inglés

Asignemos los valores

E = 3	I = –4	R = –6	V = –3
F = 9	L = 0	S = –1	W = 7
G = 6	N = 5	T = 2	X = 11
H = 1	O = –7	U = 8	Z = 10

Entonces

Z + E + R + O = 0	F + I + V + E = 5	N + I + N + E = 9
O + N + E = 1	S + I + X = 6	T + E + N = 10
T + W + O = 2	S + E + V + E + N = 7	E + L + E + V + E + N = 11
T + H + R + E + E = 3	E + I + G + H + T = 8	T + W + E + L + V + E = 12
F + O + U + R = 4		

penda del orden alfabético o de otras elecciones arbitrarias."

"Es curioso que haya tocado usted ese aspecto. Precisamente acabo de leer un artículo de 1990 aparecido en *Word Ways.* Su autor es Lee Sallows, un especialista en juegos numérico-verbales, y se titulaba 'la neomerología'. Sallows señalaba que la costumbre tradicional de asociar cada letra con su número de orden es un convenio prescindible, porque no tiene ventaja alguna. La neomerología toma este hecho como punto de partida."

"No entiendo adónde quieres ir", interrumpió la Bestia.

"Verás, tomemos, por ejemplo, la palabra inglesa 'one'. Con la ordenación alfabética habitual de ese idioma, su valor numérico (también llamado constante gemátrica) es 15 + 14 + 5 = 34. Pero para que la numerología tuviera significado intrínseco, la constante gemátrica habría de ser lo que el número denota, o sea, 1. Y no lo es."

"¿Existen números cuyos nombres tengan valor total igual al de su constante gemátrica?"

"En inglés, por lo menos, no los hay."

"¿Qué es entonces lo que ese tal Sallows en su condenado artículo propone que hagamos?"

"Que asignemos a cada letra números que no correspondan a su posición en el alfabeto. Diremos que un numeral (el nombre de un número) es perfecto si, dándole a sus letras dichos valores, su constante gemátrica es igual a su valor numérico. El problema consiste ahora en lograr que la colección de numerales perfectos sea lo mayor posible. Sallows impone la condición de que los valores asignados a las letras sean enteros. Además, letras distintas han de tener valores distintos."

"¿Con que propósito?", resopló la Bestia.

"Bueno, de esa forma se obtiene toda una pila de ecuaciones del tipo:

$$O + N + E = 1$$
$$T + W + O = 2$$
$$T + H + R + E + E = 3$$

cuyas incógnitas son las letras O, N, E, T, W, H, R, ... A continuación se mira cuántas de estas ecuaciones podemos resolver, ajustando después las soluciones posibles de manera que cumplan también otras condiciones que pudiera interesar imponer. Si nos fijamos, por ejemplo, en la ecuación $O + N + E = 1$, vemos que algunas letras habrán de tener valores negativos. Enseguida, dado que la N y la E aparecen también en NINE y en TEN, resulta razonable suponer que la N y la E tienen ya valores asignados, y ver qué pasa. Resulta así que, la O, por ejemplo, ha de verificar $O = 1 - N - E$. A partir de NINE y TEN se deduce que $I = 9 - 2N - E$, $T = 10 - N - E$. A continuación, como pretendemos que $T + W + O = 2$, hallamos que $W = 2 - O - T = 2 - (1 - N - E) - (10 - N - E) = -9 + 2N + 2E$. "Más despacio", pidió la bestia.

"Sí, hay que tener cuidado. Supongamos que decidimos empezar con $E = 4$, $N = 2$. Entonces T resulta ser igual a 4, lo mismo que E. Como eso no está permitido, es preciso elegir otros valores para E y N."

La Bestia alzó la mirada. "¡Ya lo entiendo! Supongamos que empezamos con $E = 1$, $N = 2$. Entonces será forzoso que $I = 4$, $T = 7$, $O = -2$ y $W = -3$. ¿Y si quisiéramos que también THREE fuese perfecto? Entran ahora dos letras más, H y R. Si conjeturo que $H = 3$ y aprovechamos que $T + H + R + E + E = 3$, resulta que R tiene que ser –9. Y entonces FOUR introduce dos letras más, F y U. Si opto por hacer $F = 5$, de $F + O + U + R = 4$ se sigue que $U = 10$. Estamos progresando bien, Junior."

"Muy bien. Entonces $F + I + V + E = 5$ nos lleva a que $V = -5$. Dado que SIX contiene dos letras nuevas, probaremos primero con SEVEN para determinar el valor de S. Como ha de ser $S + E + V + E + N = 7$, S tiene que ser 8. Y entonces podemos sustituir en $S + I + X = 6$, obteniendo $X = -6$. Y a continuación, tomando la ecuación correspondiente a EIGHT, obtenemos $G = -7$."

"Hasta ahora, pues, todos los numerales de ONE a TEN son perfectos. ¿No podremos ir más lejos?", quiso saber la Bestia.

"Tal vez. La única letra nueva que aparece en ELEVEN y TWELVE es la L. Sería toda una verdadera suerte que pudiéramos elegir su valor de manera que también estos dos numerales fueran perfectos."

"Sí, desde luego. Pero la verdad es que tomando $L = 11$ ambos resultan perfectos."

"Impresionante. Ahora $T + H + I + R + T + E + E + N = 7 + 3 + 4 + (-9) + 7 + 1 + 1 + 2$, que da 16."

"Me imagino que podríamos llegar más lejos tomando otros valores iniciales, más convenientes", observó Junior. "Algunos de los que tenemos no han sido más que conjeturas arbitrarias."

"No estoy seguro de que eso sirva de gran cosa. Fíjate, si tomamos la ecuación siguiente:

$$THREE + TEN = THIRTEEN$$

y simplificamos las letras que aparezcan en distintos miembros de la igualdad acabamos con que $E = I$. Lo cual infringe la regla de que letras diferentes hayan de tener valores diferentes."

"Ahora me acuerdo de que Sallows descubrió ese razonamiento. Según él, se trata de una nueva demostración merológica de que el 13 es el número de la mala suerte."

"Ya que no podemos avanzar, a lo mejor podemos retroceder. Veamos, si $Z + E + R + O = 0$, resultaría $Z = 10$."

"Entonces Z sería igual que U. Lástima."

"Sí, pero es que hemos dado valores alegremente a demasiadas letras. Tal vez podamos arreglarlo un poco cambiándolos."

Y comprobaron que sí podían [*véase el recuadro superior de esta página*].

"Sallows describe varios trucos de magia basados en ideas parecidas",

ofreció Junior. Por ejemplo, si utilizamos una asignación diferente

E = 0	I = 1	R = 5	V = 14
F = –10	L = –7	S = –11	W = –1
G = 9	N = 4	T = 6	X = 16
H = –8	O = –3	U = 12	Z = –2

se consigue que sean perfectos los numerales ZERO a TWELVE, y que lo sean también FOURTEEN, SIXTEEN, SEVENTEEN y NINETEEN. La idea consiste en preparar un juego de tarjetas, que se rotulan con las letras mencionadas y su número correspondiente. Se preparan tres tarjetas con E/0, dos con N/4 y una por cada una de las restantes, lo que da un total de 19 fichas. Se le pide a una persona del público que forme con ellas el nombre inglés de un número. Se suman las cantidades escritas en las fichas, y ¡tate!, el resultado es precisamente aquel número, salvo por el signo, que puede ser positivo o negativo."

"¿Y qué pasa si va un listillo y deletrea THIRTEEN o FIFTEEN?", inquirió la Bestia.

"Es imposible. En el mazo hay solamente una T y una F."

"Diabólico. Ese tal Sallows encajaría perfectamente aquí abajo."

"Cierto, sí. Había inventado anteriormente un truco parecido con un damero de 4 × 4 [*véase la ilustración superior de esta página*]. Elijamos en el tablero un número cualquiera. Deletreemos su nombre (en inglés) y sumemos los números asociados con sus letras, contándolos positivamente si están en cuadro blanco y negativamente si en cuadro negro. Lo mismo que antes, el resultado es el número elegido."

"Todo eso está muy bien con los numerales ingleses. *Mais en français, par exemple*?

"Sí, claro, tenemos todo un abanico de nuevas posibilidades. Los numerales franceses son UN, DEUX, TROIS, QUATRE, CINQ, SIX, SEPT, HUIT, NEUF, DIX, ONZE, DOUZE, TREIZE, QUATORZE y así sucesivamente. Podemos ahora llegar hasta 13, pero no hasta 14. Eso es debido a que al simplificar las letras comunes a los dos miembros de QUATRE + ONZE = UN + QUATORZE resulta que E = U, ecuación prohibida, pues letras diferentes han de tener asociados valores distintos. En francés, el problema es de una rigidez muy notable. Si logramos resolver los numerales en el orden correcto, desde ZERO hasta TREIZE, comprobaremos que hay 11 letras completamente determinadas por el valor de N, y que únicamente tenemos libertad para elegir la A. Es decir, estamos obligados a tener

A = *	P = 2
C = A – 5N – 4	Q = 2N + 5 – A
D = 2N	R = N – 11
E = 3N – 5	S = 2N – 4
F = 13 – 3N	T = 14 – 5N
H = 4N – 11	U = 1 – N
I = 2N + 4	X = 6 – 4N
N = *	Z = 16 – 4N.
O = 0	

Se obtiene un juego de valores diferentes (y pequeños) para todas las letras, si se toma A = 20, N = 7. Al final resultan las asignaciones

A = 20	H = 17	Q = –1	X = –22
C = –19	I = 18	R = –4	Z = –12.
D = 14	N = 7	S = 10	
E = 16	O = 0	T = –21	
F = –8	P = 2	U = –6	

De esta forma, todos los numerales franceses, desde ZERO hasta TREIZE, resultan perfectos."

"*Und auf deutsch?*"

"¡Uf! Sallows no alude al alemán en su artículo. Me parece que lo mejor será que lo intentemos nosotros mismos."

"Yo primero", dijo la Bestia. "Prescindiré del cero, porque tengo la impresión de que será mejor así. Los numerales alemanes son EINS, ZWEI, DREI, VIER, FÜNF, SECHS, SIEBEN, ACHT, NEUN, ZEHN, ELF, ZWÖLF, DREIZEHN, VIERZEHN, FÜNFZEHN, SECHSZEHN, SIEBZEHN, ACHTZEHN, NEUNZEHN, ZWANZIG. Me parece que será preferible considerar idénticas la Ü y la U ordinaria."

"En vista de la regularidad de los numerales de la segunda decena, si conseguimos resolver los de la primera decena, tendremos automáticamente los que van de DREIZEHN hasta NEUNZEHN."

"Excepto SIEBZEHN, que no es lo mismo que SIEBENZEHN."

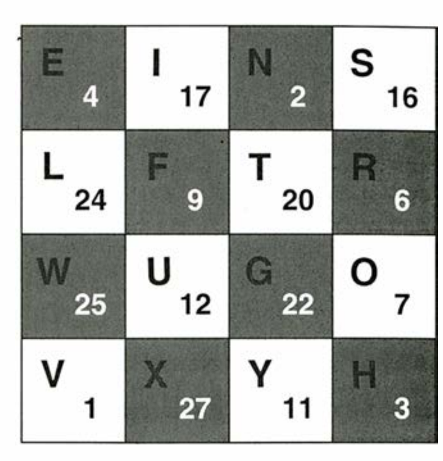
"Así es. Pero eso nos dice que como SIEBEN + ZEHN = SIEBZEHN, al simplificar tendremos E + N = 0. Y por eso, como E + I + N + S = 1, resulta que I + S = 1. Asignemos a E y a I los valores que queramos; habrá:

E = *
I = *
N = –E
S = 1 – I.

Al seguir con ZWEI, Z puede tomar un valor arbitrario y deducimos que

Z = *
W = 2 – E – I – Z.

Y así sucesivamente."



Cuadrado mágico de Lee Sallows. Elija un número cualquiera del tablero. Vaya deletreando su nombre inglés, letra por letra, y sume los números correspondientes, atribuyendo signo positivo a los de cuadros blancos y negativo a los números de los negros. El resultado será siempre el número elegido, salvo, posiblemente, el signo

"Se me acaba de ocurrir una cosa. El nombre alemán de 'veintiuno' es EINUNDZWANZIG; y después sigue la misma regla. Si hacemos que UND valga 0 en total, podríamos obtener también los números de 21 a 29, gratis, por así decirlo."

Junior y la Bestia se pasaron varias horas haciendo calculotes con la punta del rabo en las arenas sulfúreas del Hades. Al final obtuvieron este resultado:

A = –10	F = –2	N = 1	U = 8
B = 7	G = 33	O = –6	V = –8
C = –18	H = 17	R = 16	W = 13
D = 9	I = –3	S = 4	Z = –7.
E = –1	L = 14	T = 19	

Con estos valores, todos los numerales del EINS al NEUNUNDZWANZIG (29) eran perfectos.

"Buen trabajo, señor Bestia", exclamó Junior. "Me pregunto si podríamos hacer que DREIZIG (30) funcionara también. Porque entonces, sin ningún trabajo, tendríamos del 31 al 39. ¿Y qué pasará en español?"

"El mejor tormento para las almas de los terrestres, a mi entender", se jactó la Bestia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PERFECT NUMBER NAMES IN NEO-ALPHABETS. Dave Morice en su sección fija *Kickshaws*, en *Word Ways*, Vol. 22, n.º 4, pág. 238; noviembre de 1989.

THE NEW MEROLOGY. Lee Sallows en *Word Ways*, vol. 23, n.º 1, págs. 12-19; febrero de 1990.

Libros

Jordi Agustí, Luis Alonso, José Javier Etayo y Miguel Fisac

Paleontología

Ilustrada

TRILOBITES, por H. B. Whittington. The Boydell Press; Woodbridge, 1992.

Los trilobites constituyen un objeto privilegiado de estudio por parte de los paleontólogos, dada su capacidad para producir fósiles a lo largo de las distintas fases de su desarrollo ontogénico. En la primera parte del Paleozoico dieron lugar a diversas radiaciones adaptativas que cubrieron una amplia gama de nichos. Con este bagaje, H. B. Whittington, antiguo profesor en la Universidad de Harvard, ha reunido en 120 láminas fotográficas algunos de los ejemplares más significativos de este grupo. La calidad de las fotografías y de su reproducción podrá hacer pensar que nos encontramos ante un hermoso objeto de regalo o bien ante una nueva guía para coleccionistas. Nada más lejos de la realidad. La obra es una magnífica introducción al grupo y una puesta al día de diversos aspectos relativos a su paleobiología y sistemática.

El primer capítulo realiza una sucinta exposición de los caracteres generales del grupo, la terminología utilizada así como aspectos muy globales relacionados con la sistemática. Se traza luego un detallado recorrido a través de las dificultades que ha entrañado la interpretación de los apéndices y de las partes blandas del grupo, desde los trabajos de Beecher, Raymond y Agassiz a finales del siglo pasado. Mención aparte merecen los trabajos de C. D. Walcott sobre los apéndices de los llamados "trilobitomorfos" de Burgess Shale. Whittington da cuenta también de los trabajos pioneros de Stormer, quien utilizó la técnica de cortes transversales introducida por su compatriota Stensio en el estudio de los agnatos fósiles. La aplicación del análisis mediante rayos X a partir de los años veinte marcó un nuevo hito en el estudio de los apéndices de este grupo. Sin estas técnicas no podría haberse accedido a la anatomía de determinadas partes del organismo, sobre todo si se tiene en cuenta que, con más de 10.000 especies sólo en diez de ellas se conoce con detalle el aparato locomotor.

Las descripciones anatómicas se complementan con una serie de dibujos a pluma. Aunque el enfoque funcional no está ausente, se echa en falta una vinculación más estrecha con el "modo de vida" del animal y el ambiente en el que se desenvolvía (bentónico, nectónico, planctónico, o bien, suspensívoro, fitófago, etc.).

El capítulo cuarto está dedicado al crecimiento y substitución de mudas en el grupo. El enfoque inicial es histórico, desde los primeros hallazgos de larvas de *Sao* procedentes de Bohemia y compradas por el Museo de Zoología Comparada de Harvard en 1875, hasta los especímenes de *Thriartus* recogidos por C. D. Walcott en el Ordovícico superior del estado de Nueva York. Whittington describe los estadios larvales de distintos géneros, a partir de los traba-



Trilobites del Ordovícico inferior, hace unos quinientos millones de años

jos desarrollados por Beecher, Cooper y él mismo.

Al abordar la forma y función del exoesqueleto, el autor camina de puntillas sobre el tema de la interpretación funcional de la morfología de los trilobites. En un terreno en el que es fácil derivar hacia esquemas adaptacionistas (cada espina, cada apéndice descrito en función de una adaptación precisa), la timidez predomina sobre la euforia. Pero la prudencia de Whittington y su aversión a encuadrar las distintas formas dentro de morfotipos funcionales, hacen que el capítulo se convierta en una descripción pormenorizada de algunos casos concretos. De esta manera, el lector puede hacerse una idea mucho más precisa de las dificultades que entraña la interpretación de la morfología externa de estos artrópodos, aunque ello le impida superar los límites de la casuística.

Otro tanto puede decirse del capítulo sexto, titulado "Preservación y aparición", estructurado de manera imprecisa, y que finalmente se convierte en un comentario a pie de página de diversas ilustraciones de la obra. Pese a su afirmación de que "la roca que contiene el fósil proporciona la clave para conocer el ambiente en que se desenvolvió el animal", Whittington evita sistematizar este capítulo a partir de ambientes sedimentarios, sistematización que hubiese sido útil para estudiantes y geólogos interesados en las litofacies asociadas a cada tipo de trilobites.

En el apartado sobre distribución en el tiempo, evolución y clasificación, acomete una somera revisión crítica de algunos caracteres clásicamente utilizados en la sistemática del grupo e incorpora los puntos de vista de Fortey y Chatterton que basan su clasificación en el desarrollo ontogénico. Otro dato de interés de la obra es que Whittington considera a *Naraoia* y *Tegopelte*, del Burgess Shale, como auténticos trilobites, aunque de cuerpo blando, basándose en su propio trabajo sobre el primero de estos géneros y en los recientes descubrimientos de formas semejantes en Polonia y China. Aunque enunciado de una manera borrosa, tanto del texto como, sobre todo, de su figura 14 se desprende la existencia de una primera radiación de trilobites de cuerpo blando en la base del Cámbrico, a partir de la cual diversas líneas desarrollarían posteriormente exoesqueleto. Por supuesto, *Olenellus*, interpretado por algunos autores como un quelicerado, es considerado por Whittington como un verdadero trilobites. (J. A.)

Ciencia carolingia

En su contexto

CAROLINGIAN CULTURE: EMULATION AND INNOVATION. Dirigido por Rosamond McKitterick. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

SCIENCE IN WESTERN AND EASTERN CIVILIZATION IN CAROLINGIAN TIMES. Dirigido por Paul Leo Butzer y Dietrich Lohrmann. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1993.

DAS 'LORSCHER ARZNEIBUCH'. Texto, traducción y vocabularios de Ulrich Stoll. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1992.

GERBERT D'AURILLAC. CORRESPONDENCE. Texto establecido, traducido y comentado por P. Riché y J. P. Callu. Les Belles Lettres; París, 1993.

AL-FARABI AND HIS SCHOOL, por Ian Richard Netton. Routledge; Londres, 1992.

Merovingios y carolingios fueron los francos que dominaron el corazón de Europa durante los cuatro siglos intermedios entre la caída de Roma y el afianzamiento del feudalismo. Los primeros dilataron las fronteras de su influencia hasta Frisia y Turingia, por el norte, y los reinos visigóticos, por el sur. La costumbre de repartir los dominios entre los hijos hizo más difícil, sin embargo, mantener mucho tiempo la unidad territorial. La dinastía carolingia, su heredera, gobernó formalmente desde el 750 hasta el 887.

Formalmente. En realidad los carolingios eran jefes palatinos del monarca merovingio, y dueños por ende del poder, desde un siglo antes. Cuando Carlos Martel se convirtió, en el 725, en gobernador absoluto de los francos reconocía todavía la soberanía merovingia. A su muerte, en el 741, sus hijos Pepin III el Breve y Carlomán se dividieron el reino. Tras el fallecimiento de éste, Pepin asumió sus dominios y depuso en el 750 al último merovingio, Childerico III. Dividido de nuevo el reino entre los hijos de Pepin, a la muerte de Carlomán, el menor, el cetro pasó a manos de Carlomagno, quien se adueñó de la Galia y parte de Alemania e Italia, recibiendo además el tributo de bohemios, ávaros, serbios, croatas y otros pueblos del oriente europeo. El día de Navidad del año 800 se coronó emperador de un Imperio Romano cristianizado. Muerto su sucesor Luis el Piadoso, el imperio se fragmentó en tres reinos en el 843 (tratado de Verdún). Intrigas familiares, nuevas particiones y la fuerza ascendente de normandos y sajones acabaron por disolver el imperio con la caída de su último representante, Carlos III. La estirpe real carolingia, sin embargo, aún se prolongaría, con intervalos, hasta finales del siglo X.

Durante esos cuatro siglos, se va avanzando hacia la unidad lingüística, con la adopción del latín por los germanos, la unidad religiosa, con la conversión al catolicismo, la unidad administrativa y cierta uniformidad de las costumbres. Emerge también una clase aristocrática ligada a la posesión de la tierra, fermento del feudalismo posterior. La agricultura constituía, en efecto, la principal actividad económica, desempeñada por colonos, esclavos en un comienzo y arrendatarios después. El comercio mediterráneo, sin cerrarse del todo, deja paso a las transacciones con los países del norte. La Iglesia se convierte en el núcleo aglutinador.

Ella impulsa y mantiene el renacimiento carolingio, abordado en sus aspectos humanísticos en *Carolingian Culture: Emulation and Innovation*. Tómase aquí por renacimiento un nuevo despertar de la enseñanza, unido a un movimiento de reforma de las costumbres en todas las capas sociales e instituciones, procesos ambos del que era valedor máximo, desde los visigodos, el monarca. Doble fue también la influencia en el renacer franco, por un lado española, con las obras de Isidoro de Sevilla, y anglosajona por otro, con los libros de Beda. Desde el enfoque hispano, sobre todo, el renacimiento carolingio no supuso ningún corte drástico con la tradición romana y, por el flanco insular, los misioneros y *peregrini* fueron preparándolo en los *scriptoria* de monasterios como el de Corbie y Luxeuil o en la evolución de la letra minúscula, que permitía una más fácil transcripción o redacción de los manuscritos y, por tanto, de la transmisión de la cultura. De ahí que sean muchos los que cuestionan la existencia de una edad obscura europea que transcurriera desde el 630 hasta el 750 y, en consecuencia, que pueda hablarse en puridad de un verdadero renacimiento. En cuanto a la reforma de las costumbres de los bárbaros y neoconversos, la sucesión de concilios merovingios y carolingios, con el espejo toledano, atiende a las directrices que emanan de Roma.

Para asegurar el éxito de la enseñanza y reforma se establece una

estructura jerárquica y centralizada, que cobra su expresión en una serie de documentos capitulares cuya cima es la *Admonitio generalis* del 789, del propio Carlomagno. Las 82 cláusulas de que consta deben "aconsejarse (eso quiere decir "admonitio"), inducirse su cumplimento y, si fuera necesario, obligarse a ello", para conseguir la paz, la concordia y la unanimidad entre los súbditos y fieles a un tiempo. Se refiere la cláusula 72 a la enseñanza y dicta que monasterios y escuelas catedralicias enseñen los salmos, la notación musical, el canto, la matemática y la gramática; debe esta cláusula completarse con otros documentos, así uno del abad Baugulf de Fulda, sobre el "cultivo del saber". Pero el programa lo encarna Alcuino.

El pensamiento político, de origen también hispano y sajón, fue tomando cuerpo en el mundo galo con el sentimiento de la preeminencia de la *gens* franca sobre las otras *gentes* del reino y luego del imperio, y, de forma paralela, con la absolutización del poder central, que, sin embargo, no llegó a ahogar las semillas del constitucionalismo incipiente al apoyarse en fuerzas intermedias ligadas a los señoríos.

La lengua común, el latín o *lingua franca*, facilitaba las relaciones de vinculación. Su estudio en las escuelas no se circunscribía al dominio del arte de la gramática (declinación y conjugación, sintaxis, figuras retóricas, comentarios de los textos clásicos), sino que se prolongó en el ejercicio de la lógica y la dialéctica. Floreció una literatura latina propia, poesía sobre todo, sin abandonarse el cultivo del viejo alemán o el viejo sajón.

Otras facetas de la cultura, como la historia, el arte o la música, derivaron también de una emulación de la antigüedad clásica a una innovación genuina. La historia ayudó a crear el sentimiento de identidad nacional, al enhebrar la continuidad de los antepasados con el presente. Hubo una interpretación religiosa, que veía en el imperio el nuevo Israel escogido, y una relación más apegada al suceder diario, los "anales", no siempre escritos por archiveros de cancillería. El arte carolingio destaca en las miniaturas de los códices, renovadores en material y formato, así como en la escultura de copas, cálices y medallones, de plata y marfil.

Ese esplendor cultural remataba un esfuerzo regenerador que había comenzado en el último tercio del siglo VIII, objeto de estudio en *Science in Western and Eastern Civilization in Carolingian Times*, ambiciosa revisión de la astronomía, matemática y técnica, precedida por un análisis de los centros de transmisión del saber en Europa occidental.

Los centros, en su origen o en su apogeo, van asociados a una figura que los representa. Aquí, Alcuino, quien arriba a la corte de Carlomagno el mes de marzo del 781 con el encargo de crear la escuela donde se enseñen las siete artes liberales que constituían entonces el cuerpo del saber. Aconseja al monarca en el gobierno, corrige errores de las traducciones vétero y neotestamentarias y escribe poemas, 25 libros y un copioso epistolario, del que sobreviven 300 cartas de diverso tenor, ocho cruzadas con Carlomagno sobre problemas relativos a la astronomía y al calendario; interviene, de forma decisiva, en la enciclopedia sobre la coordinación del tiempo. Procedía de York, núcleo de intensa actividad cultural en la primera mitad del siglo octavo. Sabida es, en efecto, la importancia de los monasterios de



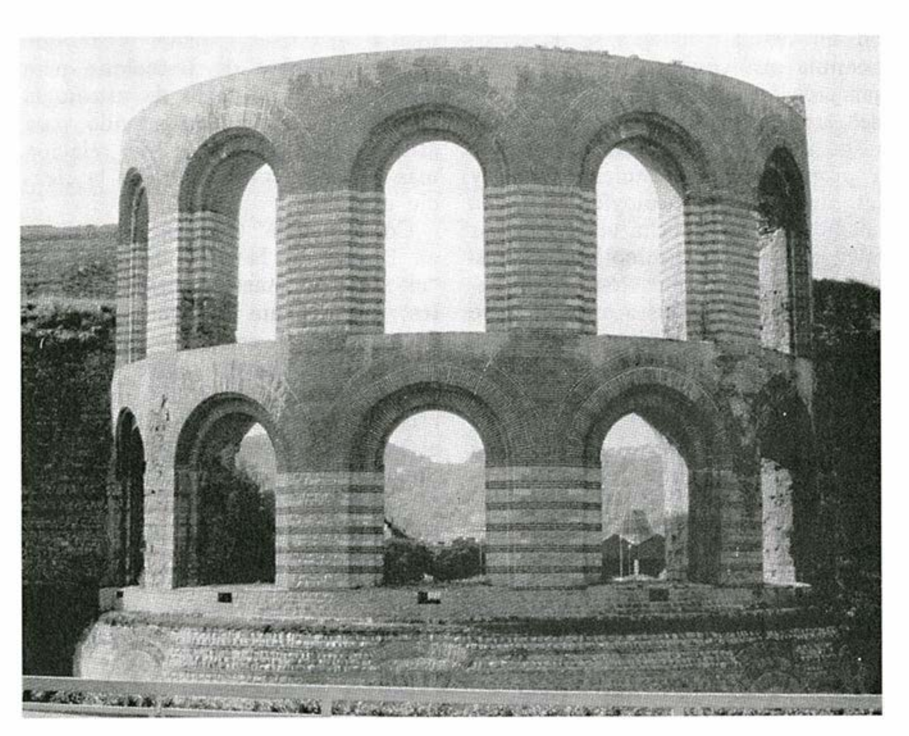
Miniatura del Psalterio de Stuttgart: enseñanza a pobres e ignorantes. (Württembergische Landesbibliothek Biblia folio 23)

las islas (Irlanda, sobre todo) en la conservación y estudio de las obras de los clásicos grecolatinos.

Si la arquitectura carolingia no puede entenderse sin referencia a la bizantina, la capilla real de Aquisgrán remeda la octogonal de San Vitale de Rávena, mucho menos comprenderemos su ciencia y técnica si la descontextualizamos de las aportaciones contemporáneas de bizantinos y musulmanes. Stephen C. McClusky pone la primera espiga en esa gavilla de colaboraciones con un estudio general sobre las ideas astronómicas del occidente latino desde el siglo quinto al nono. Distingue cuatro tradiciones fundamentales: una astronomía popular, basada en la división del año en solsticios y equinoccios; una astronomía aritmética o computacional, desarrollada para fijar la fiesta de la Pascua; una astronomía observacional, que sigue el curso de las estrellas para medir la sucesión de las horas de la noche, y, por último, una astronomía geométrica de órbitas excéntricas, epiciclos y apogeos, cuyo refinamiento irá al compás de una profundización en las obras de Plinio, Marciano Capella e Isidoro, según expone Bruce Eastwood.

En los siglos octavo y nono, la astronomía bizantina, de fuerte componente astrológico en Estéphanos y Teófilo de Edessa, ilustra, con soberbias miniaturas, el *Almagesto* de Ptolomeo; los árabes de esas centurias, por su parte, elevan el tono de sus nociones rudimentarias sobre el cielo y las estrellas, que les permitían orientarse por el desierto, con la traducción de los textos griegos y helenísticos de los pueblos conquistados y su pronta habilidad en la construcción de relojes solares, esferas armilares y astrolabios.

Para entrenar en el cálculo y la matemática a sus alumnos, Alcuino redactó una cincuentena larga de problemas, varios de ellos clásicos desde los egipcios y retomados por griegos y latinos, en sus *Propositiones ad acuendos iuvenes*. Se trata de problemas con una incógnita: $nx + p = 100$ (siendo n un número racional o suma de números racionales, p un entero positivo o cero), ecuaciones de segundo grado, cálculo de áreas y otros de geometría elemental. Menso Folkerts y Helmuth Gericke los analizan, formalizan y traducen aquí. En Bizancio, y en el tercio central del siglo noveno, sobresale León "el matemático", renovador de la enseñanza de la Universidad Bardas y promotor del estudio de los textos matemáticos clásicos: las *Cónicas* de Apolonio, la *Astronomía* de Teón, los *Elementos* de Euclides, etcétera. Por su parte, los árabes contemporáneos, que han entrado en contacto con la ciencia india, fomentan el desarrollo del álgebra, la geometría, la teoría de números, la matemática recreativa y los cuadrados mágicos. Paul L. Butzer traza un sumario perfil y despliega un tríptico pedagógico de las figuras estelares de esos tres mundos coetáneos.



Arquitectura civil carolingia: baños del emperador en Tréveris

De los persas reciben los musulmanes un notable legado técnico, en particular ruedas hidráulicas y molinos. *El libro de los aparatos ingeniosos* refleja, en su aparente sentido lúdico, un dominio sobresaliente de los principios de la mecánica o la neumática: lámparas que se autoabastecen y autoencienden, fuentes que cambian de forma a intervalos, máscaras de gas para protegerse en la limpieza de los pozos negros y autómatas musicales. Por el lado carolingio, se atiende aquí al desarrollo de la metrología, es decir, la unificación del sistema de pesos y medidas con distintos fines prácticos, desde la composición de las monedas hasta las medidas de granos, pasando por la topografía.

Podemos llenar el vacío sobre las ciencias de la vida de las dos obras comentadas con la tesis doctoral de Ulrich Stoll *Das 'Lorscher Arzneibuch'*, número 28 de la colección Sudhoffs Archiv de historia de la ciencia. Se trata de un compendio médico-farmacológico del siglo VIII, puntal para el conocimiento de la terapéutica y materia médica anterior a la Escuela de Salerno y elaborado en pleno apogeo carolingio.

De acuerdo con los cánones precede a la presentación y traducción en página contigua del *Codex Bambergensis Medicinalis* 1, título de su referencia habitual, una introducción académica sobre el estado de la cuestión en torno a la farmacología general en ese intervalo de tiempo, en que ha desaparecido ya el último de los autores clásicos de la terapia galénica, Pablo de Egina, y se copian en los monasterios los libros de plantas curativas ("simplicia") y antidotarios ("composita"). *Das 'Lorscher Arzneibuch'*, redactado en torno al 795, recoge una larga tradición que arranca de doble fuente, la naturalista de Plinio y Dioscórides y la recetaria de Scribonius Largus, para ir incorporando, sucesivamente, influencias de Galeno, Sorano, Pseudo-Apuleyo, medicina bizantina, Marcelo, Celio Aureliano y Aurelio-Esculapio, entre otros. Tampoco en fitomedicina, el renacimiento carolingio supone ningún corte.

Sorprende, además, el grado de elaboración del texto. Da lo mismo que se aplique a especular sobre el sentido trascendente de la enfermedad y la salud, a resolver los llamados problemas de Aristóteles (un cuestionario sobre física médica) o a detallar la composición y finalidad de determinado antídoto. Produce la impresión de que las definiciones están troqueladas. Así, raramente se derrocha espacio a la hora de descri-

bir un vegetal, del que se da la sinonimia más común, su efecto en la sanación, su talla, parte comestible del fruto, forma de la raíz u otro rasgo de interés. El patrón se repite a propósito de las enfermedades y las medidas o posología. Stoll ha añadido de su cosecha unos valiosos apéndices sobre terminología naturalista, anatómica y nosológica que habrán de ayudar mucho a quienes se adentren en la biología anterior a las grandes enciclopedias medievales.

La relación de España, de la Marca Hispánica, con el renacimiento carolingio pivota en torno a la figura de Gerbert d'Aurillac, cuya *Correspondence* acaba de publicar en dos tomos la Asociación Guillaume Budé. Ese eximio representante de los últimos carolingios, con veleidades para con los capetos, ha constituido el revulsivo de la historiografía española sobre la aportación árabe a la ciencia europea medieval desde el escritorio del monasterio de Ripoll.

Gerbert d'Aurillac, nacido entre el 940 y el 945 de una familia modesta, entró de niño en el monasterio de Saint-Géraud en Aurillac. Ante las muestras de su inteligencia privilegiada, el abad se lo encomienda a Borrell, conde de Barcelona, para que se le instruya en los cenobios de la Marca, abiertos a la ciencia árabe y en los que pasará tres años. En Vich y Ripoll estudia el *quadrivium* (aritmética, geometría, astronomía y música). Artes liberales que impartirá luego él en la escuela catedralicia de Reims, con tal éxito que acudían allí alumnos de todas partes del imperio. Ese será uno de los caminos de propagación, se supone, de la astronomía árabe por Europa. Aunque hoy se ponen en duda muchas de las obras a él atribuidas, sí construyó esferas armilares y un reloj. No siempre acertó en su mediación política entre los pretendientes al trono carolingio, pero se mantuvo fiel a Roma en tiempos de un galicanismo incipiente. Fue elegido papa en el año 999 con el nombre de Silvestre II.

El *corpus* de las cartas, que nos han llegado a través de dos manuscritos, el de Leiden y el de Roma, fue compendiado por él mismo de su amplia correspondencia. Abundan las de carácter administrativo y de mediación política; otras hablan de su inquietud intelectual (solicitud de manuscritos, filosofía, astronomía, medicina, retórica, epigramas). Justamente la que pide a Bonfill de Gerona una copia del ejemplar sobre "multiplicación y división de los números" de José Español y la que dirige a Llobet de Barcelona para que le remita el texto de astrología que ha traducido han servido para afianzar la hipótesis de una relación más o menos continuada con la ciencia española.

Corresponden esos mismos años, en Bagdad, a la edad de al-Farabi, "el segundo maestro" tras Aristóteles, sobriamente esbozada por Ian Richard Netton en *Al-Farabi and his School*, transcurrida entre el nacimiento de éste en el 870 de la era cristiana y la muerte de Abu Hayyan al-Twahidi, en torno a 1023. Se distinguió por el cultivo de la lógica y de la teoría del conocimiento, con especial énfasis en la clasificación y relación entre las ciencias. Además del fundador de la escuela y su epígono último, merecen atención Yahya b. Adi, Abu Sulayman al-Sijistani y Abu l-Hasan al-Amiri.

No era en el Oriente musulmán la situación política más tranquila que en los reinos carolingios disgregados. También el impulso de la cultura dimanaba en aquél de la corte y de los visires, entre cuyos protegidos menudeaban núcleos cristianos emigrados de Bizancio. Discípulo de un nestoriano fue al-Farabi, de quien bebió el núcleo de la filosofía griega, como se desprende de sus varios libros sobre epistemología. En su obra más característica, *Catálogo de las ciencias*, traducida al castellano por Angel González Palencia, se propone construir una propedéutica para introducirse en los diferentes ramos del saber: el lenguaje, la lógica, la matemática, la física, la metafísica, el derecho y la teología. Ciencias que subdividía, a su vez; por ejemplo, la matemática abarcaba algo más que el *quadrivium* medieval, para dar cabida a la óptica, a los pesos y medidas y a los ingenios mecánicos.

Entendía la física a la manera aristotélica, basada en las cuatro causas clásicas, centrada en los cuerpos dotados de masa y sus accidentes y diversificada en el estudio de la materia inerte (mecánica y mineralogía) y la materia viva (botánica y zoología). Todo eso pertenecía al ámbito de lo que se podía conocer. Pero, a la manera platónica, había asuntos que le estaban negados al hombre o que sólo podía tener acceso a ellas por vía negativa, es decir, afirmando lo que no eran. De esa mezcla de aristotelismo y platonismo, expresada sobre todo en la teoría psicológica del alma y de las facultades del conocimiento, participarán sus seguidores. (L. A.)

Algebra

Manuales

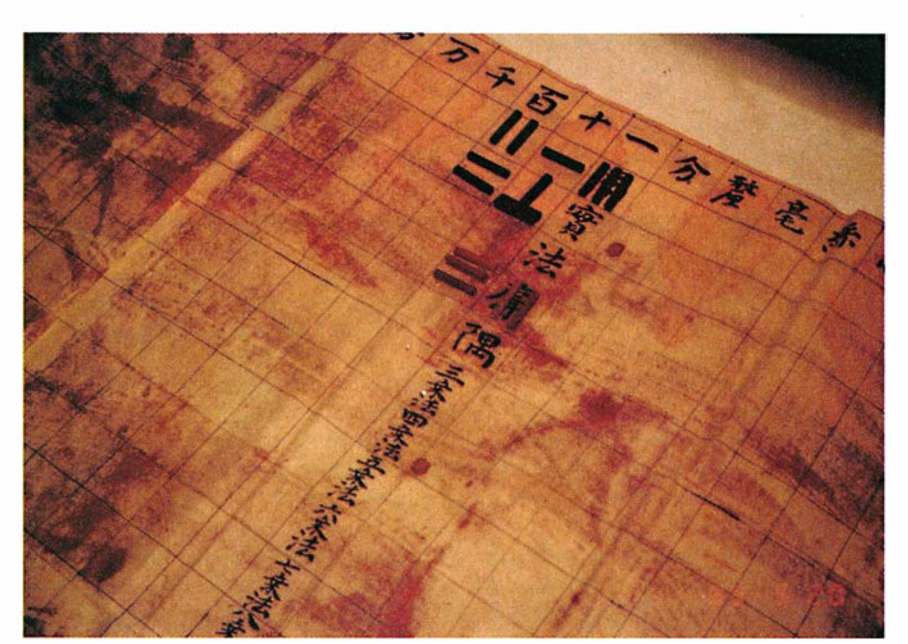
Introducción al álgebra, por X. Xambó, F. Delgado y C. Fuertes. Editorial Complutense; Madrid, 1993.

Es éste el primer volumen de los dos que han de componer la obra. Recogen en conjunto las lecciones por ellos desarrolladas en dos de las asignaturas de la facultad de matemáticas de la universidad editora y pueden servir perfectamente de texto a cursos de análogo rango y contenido.

Esquemáticamente describiríamos su programa como un recorrido a las estructuras algebraicas fundamentales, grupos, anillos, factorización, teoría de Galois y sus aplicaciones. No se ha pretendido, pues, exhibir novedad alguna en cuanto a la elección de los temas, que se solapan necesariamente —se lee en el prólogo— con los de otros textos de álgebra, especialmente abundantes, del mismo nivel, sino en el tratamiento de los mismos.

Nos ceñiremos a este primer tomo que tenemos bajo comentario y que desarrolla dos de los seis capítulos (el séptimo está dedicado a las soluciones de los problemas) de que consta la obra total. El primero de ellos, extrañamente titulado "Raíces...", responde tal vez, y responde bien, a esa táctica de las "motivaciones" que tanto suelen recomendarnos los pedagogos de afición. Sabido es que, hasta bien entrado el siglo pasado, el álgebra no tenía más cometido que el de resolver ecuaciones; cuando hoy la miramos además como el estudio de estructuras abstractas definidas por determinadas operaciones que de modo amplio y flexible generalizan las habituales de la aritmética, puede resultar difícil encontrar el nexo entre ambas concepciones. Pues bien, este primer capítulo ataca esta aproximación entrelazando conocimientos clásicos —números complejos, polinomios, ecuaciones de tercero y cuarto grado— con los que van dejando ya de ser "modernos", como los de cuerpos y sus extensiones, números algebraicos y transcendentes, números construibles con regla y compás y la consiguiente imposibilidad de solución para problemas seculares de la geometría griega.

El capítulo segundo está dedicado a los grupos. Expone la teoría general, tanto en su consideración interna como en la de los grupos de operadores, llegando a los teoremas de estructura de grupos y formas canó-



Uso de palillos para la presentación china de los números según un sistema decimal y posicional

nicas y acompañándose de abundantes ejemplos, como los grupos clásicos, los de los poliedros, los cristalográficos o los de la mecánica, newtoniana o relativista.

Es de alabar, junto al rigor, la claridad: acceder a cada noción con el menor número de presupuestos necesarios y obtener así la máxima información y aplicación de los resultados alcanzados. Un buen número de problemas y ejercicios significativos van intercalados a lo largo del texto, y al final de los capítulos se inserta una colección de problemas complementarios. También cada capítulo incluye una serie de "notas y complementos" de variada intención: desde aspectos históricos a puntualizaciones concretas de la teoría desarrollada en él, desde incursiones de esta teoría en otras ramas científicas a notas bibliográficas bien comentadas.

Hay un apéndice auxiliar para quien precise refrescar las ideas previas que permitan una correcta lectura del texto. Se refiere este apéndice a los elementos de la teoría de conjuntos, incluyendo en particular los problemas de ordenación, que no van a tener gran incidencia en el texto pero se agradece su presentación sencilla y asequible, frente a la farragosidad de otras. Una segunda parte del apéndice se dedica a una breve recapitulación de los números enteros y racionales.

Al corresponderme ahora su comentario no he podido evitar la evocación de lo que en el último medio siglo, aproximadamente, ha evolucionado entre nosotros la enseñanza de esta disciplina. Allá a mediados de los cuarenta, cuando iniciaba yo mis estudios y prácticamente nadie había oído hablar de estas cosas, tuve el privilegio de entrar en la órbita de un maestro, el profesor Abellanas, que nos plantó de cara el libro que pronto se convirtió en un clásico: *Modern Algebra*, de van der Waerden, todavía en su versión original alemana. Nunca olvidaré la impresión de solidez, de edificio levantado ladrillo a ladrillo, sin concesión alguna a lo superfluo, que su estudio, admirativamente, me causaba. Casi al final de mi licenciatura nos llegó un segundo libro, el de Birkhoff y MacLane, lleno de modelos preparatorios, ejemplos y brillantes sugerencias que, por comparación, me producía la sensación de estar acampando en un ameno prado. Poco después, siendo todavía un meritorio de la docencia universitaria, hube de encargarme de una asignatura —"Algebra Superior", me parece que se llamaba entonces— y la saludé con la simultánea aparición de la *Commutative Algebra* de Zariski y Samuel que, por cierto, no veo citada en la no parca bibliografía contenida en el libro hoy comentado.

Creo que, como textos, éstos fueron los tres primeros más característicos. Después se han escrito muchos y, afortunadamente, jóvenes profesores españoles son hoy —y desde hace bastantes años también— autores destacados de algunos de ellos. Al celebrar ahora la aparición de uno más, y con buenas hechuras, bien puede permitírseme, espero, esto que no pasa de nostálgico desahogo de un veterano. (J. J. E.)

Arquitectura

Ideas y modas

THE BUILT, THE UNBUILT AND THE UNBUIDABLE, por Robert Harbinson. Thames and Hudson; Londres, 1993.

Los movimientos pendulares son típicos de las cambiantes actitudes culturales. De las locuras curvilíneas del Rococó se pasa, sin solución de continuidad, a las secas austeridades rectilíneas del Neoclásico.

Tampoco nos puede extrañar que, a continuación de las rigideces constructivas y estéticas de la arquitectura racionalista, funcionalista y hasta pragmáticamente empirista que recorre un período triunfal que comienza en los años veinte de nuestro siglo, se inicien, pasados los sesenta, movimientos en otros sentidos, que tratan de tomar como elementos dominantes las facetas que estuvieron olvidadas o relegadas antaño a posiciones irrelevantes.

Tal vez el libro de Robert Venturi *Complejidad y Contradicción en la Arquitectura*, con su desenfadada puesta en solfa del dogmático y engreído "movimiento moderno", fuera el toque de atención del cambio del viento y aviso del nublado arquitectónico que se nos venía encima: arquitectura posmoderna, deconstrucción, etcétera.

El libro de Robert Harbinson que motiva estas reflexiones está también en la línea de tomar distancias para enjuiciar el problema arquitectónico; como medio de mayor objetividad, utiliza la realización de los ejemplos presentados y los "materiales", no de primera calidad, sino laterales, marginales y hasta de desecho, con que se hace ese análisis. No se propone acometer un estudio directo, sobre la arquitectura pura y dura, sino buscar pistas en el análisis de factores aparentemente secundarios, laterales o irrelevantes: jardines, monumentos, fortificaciones. En el fondo, lo que se percibe en un juicio aparentemente desapasionado de la arquitectura es la busca de una nueva vanguardia capaz de inscribir en su órbita aquellas carencias que, a toro pasado, se han podido detectar en el "movimiento moderno".

El autor busca en compartimientos oblicuamente relacionados la sorpresa. Así en capítulos que, como el protagonizado por jardines, enfrente ejemplos tan dispares y lejanos como el jardín clásico francés y el Zen japonés, seguidos de la campechana mezclanza de otros ejemplos lindantes con el disparate. (M. F.)

Apuntes

Los sondeos de sedimentos marinos y los testigos de núcleos de hielo nos han familiarizado con la amplia variabilidad climática registrada en el Atlántico Norte durante el último cuarto de millón de años. De alguna u otra forma, todos los estudios terminaban por atribuir la razón última de esos cambios a los caprichos de la circulación termohalina de la franja septentrional del océano. El recurso a la modelización permite dilatar las fuentes de información. La aportación de agua menos densa del Pacífico a través del estrecho de Bering, se dice ahora, contribuye también a la circulación termohalina atlántica y, por ende, a la variabilidad climática.

Confiados en la capacidad que poseen las células de reparar las lesiones que se producen en la membrana, podemos acometer ciertos ensayos que implican rasgar esa envoltura protectora. Para volver a sellarse, las células sólo precisan que haya calcio en su vecindad, lo que para algunos indicaba que también participaba ese ion en la reparación de las lesiones. Se conoce ahora algo más: el proceso implica la liberación y fusión de vesículas.

Los filósofos existencialistas de los años cuarenta y cincuenta meditaban sobre la naturaleza humana como un proyecto nacido para la muerte. Los biólogos retuercen el argumento y dicen, con toda razón, que la muerte es necesaria para la vida. La eliminación de células sobrantes e inadaptadas es necesaria para el desarrollo del embrión, la metamorfosis, la formación de tejidos y el establecimiento del sistema inmunitario. Se procede con paso firme hacia la disección de la muerte celular; el último eslabón remontado ha sido el descubrimiento del ligando que dispara la muerte celular a través de su unión con su receptor de superficie.

La biodiversidad no es sólo una palabra eufónica en el diccionario del ecologista. Constituye un concepto fundamental de la teoría ecológica. La biodiversidad, dice ésta, favorece la estabilidad de los ecosistemas. Pero andaban escasos esos principios de trabajos de campo. Tras el seguimiento tenaz del comportamiento de las praderas se ha llegado a la conclusión según la cual la productividad primaria de comunidades ricas en especies resiste mucho mejor las sequías que otras más homogéneas. No sólo resiste mejor; se recupera antes también.

En el juego de las simplificaciones en la ciencia, algunas han hecho fortuna. Recordemos el "efecto mariposa" del que hablan los meteorólogos, que relaciona el aleteo del insecto en China con un huracán del Caribe; o las corrientes que elevan la temperatura en Europa, oceanógrafos *dicunt*, causadas por corrientes que tienen su origen en los estrechos de las islas de Indonesia. La más aventurada, y última hasta la fecha, de las globalizaciones unce la aparición del género *Homo*, ocurrida hace tres millones de años, en Africa a la colisión entre Asia y la India producida 40 millones de años antes. El hilo de engarce sería el cambio de clima que este fenómeno desencadenó.

Desde los comienzos de la neurología se ha venido afirmando que el carácter diestro de la mayoría de los humanos (nueve de cada diez) y otros aspectos de la lateralización de la conducta humana nacían de la estructura de los hemisferios cerebrales. La tesis ha recibido una confirmación reciente: la medición del sulcus central humano, formado por los giros precentrales y poscentrales, revela que la región del cerebro que gobierna la extremidad superior difiere de un hemisferio a otro.

Los grandes telescopios que se hallan en fase de construcción prometen obviar un tope clásico: detectar planetas fuera del sistema solar. La óptica adaptativa que les caracteriza será suficiente para distinguir planetas entre la luz de fondo dispersa, que brilla un billón de veces más.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PROTEINAS ENTRE COMPARTIMENTOS INTRACELULARES, por Luis S. Mayorga y María Isabel Colombo

Las macromoléculas atraviesan los distintos compartimentos membranosos de la célula merced a mecanismos regulados por GTP.

ONDAS DE DENSIDAD DE CARGA Y DE ESPIN, por Stuart Brown y George Grüner

En determinados metales, los electrones se disponen en patrones cristalinos que se mueven al unísono, responden de manera peculiar a los voltajes aplicados y se autoorganizan.

REPRESENTACION VISUAL DE LA MENTE, por Marcus E. Raichle

La combinación de las ciencias cognitivas con las técnicas modernas de obtención de imágenes nos permiten observar en operación a los sistemas neurales subyacentes al pensamiento.

PELICULAS SUPRACONDUCTORAS, por Michel Lagües

El depósito de películas superconductoras capa atómica a capa atómica produce materiales cuyas temperaturas críticas son muy superiores a las que se habían obtenido desde 1987.

QUIMICA Y FISICA EN LA COCINA, por Nicholas Kurti y Hervé This-Benckhard

Los químicos se han adentrado en la cocina para conocer los secretos de los platos maestros y, de paso, ofrecen, modestamente, sus propios consejos culinarios.

OBJETOS DE METALES PRECIOSOS DEL SICAN MEDIO, por Izumi Shimada y Jo Ann Griffin

Hubo una cultura peruana, anterior a la inca, que trabajó el oro y otros metales con un dominio sin precedentes. La investigación en las técnicas de conformación metálica del Sicán ha empezado a correr el velo que ocultaba a esa misteriosa sociedad.

LA MISION PIONEER A VENUS, por Janet G. Luhmann, James B. Pollack y Lawrence Colin

Durante catorce años el explorador espacial, dotado de múltiples componentes, escudriñó la atmósfera, las nubes y el medio ambiente del planeta más cercano. Los resultados aclaran la dispar historia evolutiva de Venus y la Tierra.

DILEMAS ANTE EL CANCER DE PROSTATA, por Marc B. Garnick

En las fases iniciales de una terapia agresiva del cáncer de próstata, ¿superan los riesgos a los posibles beneficios? Esta es una de las cuestiones aún no resueltas con las que han de enfrentarse quienes tratan, o quienes padecen, esa clase de tumor.

